

La ricorsione nel linguaggio

CAPITOLO 1: SINTASSI RICORSIVA - IL CUORE DELLA GRAMMATICA

1.1 Fondamenti Teorici della Ricorsione Sintattica

La ricorsione sintattica rappresenta uno dei fenomeni precipui e fondamentali della linguistica teorica, costituendo secondo molti studiosi la proprietà definitoria che distingue il linguaggio umano da tutti gli altri sistemi di comunicazione presenti nel regno animale. Quando parliamo di ricorsione sintattica, ci riferiamo alla capacità intrinseca delle strutture grammaticali di incorporare al proprio interno istanze di se stesse, creando così costruzioni potenzialmente infinite a partire da un insieme finito di regole produttive.

Il concetto di ricorsione nel linguaggio naturale non deve essere confuso con la semplice ripetizione o iterazione. Mentre la ripetizione implica la giustapposizione di elementi simili sullo stesso livello strutturale, come nelle coordinazioni del tipo "Maria e Giovanni e Luca e Sofia andarono al cinema", la ricorsione autentica comporta l'incorporamento di una struttura all'interno di una struttura dello stesso tipo, creando livelli gerarchici annidati di complessità crescente. Questa distinzione è cruciale per comprendere la natura profonda della sintassi umana.

La proprietà ricorsiva della sintassi permette ai parlanti di generare e comprendere frasi che non hanno mai incontrato prima, utilizzando meccanismi produttivi che applicano le medesime regole a diversi livelli di profondità strutturale. Questo fenomeno è strettamente connesso con quello che Humboldt definiva "l'uso infinito di mezzi finiti", ovvero la capacità del linguaggio umano di esprimere un numero potenzialmente illimitato di pensieri distinti utilizzando un inventario limitato di unità lessicali e un insieme finito di regole combinatorie.

1.2 La Posizione di Chomsky: Ricorsione come Proprietà Definitoria

Noam Chomsky ha posto la ricorsione al centro della sua teoria linguistica fin dai lavori pionieristici degli anni Cinquanta del Novecento. Nella sua opera fondamentale "Syntactic Structures" del 1957, Chomsky dimostrò che le grammatiche a stati finiti, che non permettono ricorsione genuina, sono inadeguate per descrivere le lingue naturali. Egli argomentò in modo convincente che solo le grammatiche formali che incorporano regole ricorsive possono generare l'insieme infinito delle frasi grammaticali di una lingua naturale.

Per Chomsky, la ricorsione non è semplicemente una proprietà interessante tra le molte che caratterizzano il linguaggio umano, ma rappresenta il nucleo stesso della facoltà linguistica. Nella sua formulazione più recente del Programma Minimalista, Chomsky e i suoi collaboratori hanno proposto che l'operazione fondamentale della sintassi, chiamata "Merge" (fusione), sia intrinsecamente ricorsiva. L'operazione Merge prende due oggetti sintattici e li

combina per formare un nuovo oggetto sintattico, che può a sua volta essere sottoposto all'operazione Merge. Questa semplicissima operazione, applicata ricorsivamente, è in grado di generare strutture sintattiche di arbitraria complessità.

In un articolo del 2002 scritto insieme a Marc Hauser e Tecumseh Fitch, Chomsky ha proposto che la ricorsione potrebbe essere l'unica proprietà che appartiene esclusivamente alla facoltà linguistica in senso stretto, distinguendola da altre capacità cognitive. Secondo questa ipotesi, nota come "ipotesi della ricorsione", tutti gli altri aspetti del linguaggio umano potrebbero essere condivisi con altri sistemi cognitivi o con i sistemi di comunicazione di altre specie, mentre la ricorsione sintattica rappresenterebbe la vera innovazione evolutiva che ha reso possibile il linguaggio umano nella sua forma attuale.

Questa posizione ha generato un dibattito intenso nella comunità scientifica. Alcuni ricercatori hanno contestato l'idea che la ricorsione sia unica al linguaggio umano, citando esempi di comportamenti apparentemente ricorsivi in altre specie, come la costruzione di nidi da parte di alcuni uccelli o le chiamate di allarme di certi primati. Tuttavia, questi esempi sono generalmente considerati casi di iterazione piuttosto che di autentica ricorsione gerarchica, e la questione rimane oggetto di discussione.

1.3 Embedding e Annidamento Strutturale

L'embedding, o annidamento strutturale, costituisce la manifestazione più evidente della ricorsione sintattica nelle lingue naturali. Quando parliamo di embedding, ci riferiamo all'inserimento di una clausola completa all'interno di un'altra clausola, creando strutture sintattiche stratificate in cui ciascun livello mantiene la propria integrità grammaticale pur essendo subordinato alla struttura che lo contiene.

Consideriamo l'esempio paradigmatico fornito: "Il gatto che il cane che il bambino vide inseguì scappò". Questa frase, benché complessa e difficile da processare, è perfettamente grammaticale e illustra magnificamente il principio dell'embedding ricorsivo. Analizziamo la sua struttura in dettaglio. La clausola principale è "Il gatto scappò", che costituisce la spina dorsale semantica e sintattica dell'intera espressione. All'interno di questa clausola principale, il sintagma nominale "il gatto" è modificato da una proposizione relativa: "che il cane inseguì". Questa prima proposizione relativa introduce un nuovo partecipante, "il cane", che a sua volta è modificato da una seconda proposizione relativa annidata: "che il bambino vide".

La rappresentazione formale di questa struttura può essere espressa attraverso una notazione ad albero sintattico o mediante parentesizzazione. Utilizzando quest'ultima notazione, otteniamo: [S [NP Il gatto [RC che [NP il cane [RC che [NP il bambino] vide]] inseguì]] scappò]. Ogni coppia di parentesi quadre rappresenta un costituente sintattico, e l'annidamento delle parentesi riflette l'annidamento delle strutture sintattiche.

La regola ricorsiva che genera queste strutture può essere formalizzata come segue. Partiamo dalla regola di base per i sintagmi nominali: $NP \rightarrow Det\ N$. Questa regola può essere espansa per permettere modificazione: $NP \rightarrow Det\ N\ (PP)\ (RC)$, dove PP indica un sintagma preposizionale e RC indica una proposizione relativa, entrambi opzionali come indicato dalle parentesi tonde. La regola per le proposizioni relative è: $RC \rightarrow che\ S$.

Crucialmente, la regola per la frase S include: $S \rightarrow NP VP$, e poiché NP può contenere RC , e RC contiene S , abbiamo un ciclo ricorsivo: $S \rightarrow NP \rightarrow RC \rightarrow S$.

Questo ciclo ricorsivo nelle regole grammaticali è ciò che rende possibile l'annidamento infinito, almeno in linea di principio. Nella pratica linguistica reale, tuttavia, i limiti della memoria di lavoro umana impongono vincoli stringenti sulla profondità dell'annidamento che può essere effettivamente processato e compreso. Mentre due o tre livelli di embedding sono generalmente comprensibili con uno sforzo cognitivo ragionevole, frasi con quattro o più livelli diventano estremamente difficili da processare, anche se rimangono teoricamente grammaticali.

1.4 Center-Embedding versus Tail-Recursion

Una distinzione cruciale nello studio della ricorsione sintattica è quella tra center-embedding e tail-recursion, due modalità diverse di implementare l'annidamento ricorsivo che hanno conseguenze radicalmente differenti per la processabilità cognitiva delle strutture risultanti.

Il center-embedding, come suggerisce il nome, comporta l'inserimento di una struttura ricorsiva al centro di un'altra struttura dello stesso tipo. L'esempio classico in lingua inglese è: "The rat the cat the dog chased killed ate the malt", che tradotto letteralmente in italiano suonerebbe come "Il topo che il gatto che il cane inseguì uccise mangiò il malto". In questa costruzione, la clausola principale "The rat ate the malt" viene interrotta dall'inserimento di una proposizione relativa "the cat killed", che a sua volta viene interrotta dall'inserimento di un'altra proposizione relativa "the dog chased". Il risultato è una struttura in cui i verbi principali ("ate", "killed", "chased") appaiono raggruppati insieme alla fine della frase, separati dai loro rispettivi soggetti che appaiono all'inizio.

Questa disposizione crea un carico cognitivo enorme sulla memoria di lavoro del processore, sia esso umano o artificiale. Il motivo è che durante il parsing della frase, quando si incontra il primo sintagma nominale "the rat", il sistema deve mantenere attiva l'aspettativa del verbo corrispondente mentre processa il materiale annidato. Quando incontra "the cat", deve aggiungere una seconda aspettativa alla pila di elementi da tenere in memoria. Con "the dog", si aggiunge una terza aspettativa. Solo quando si arriva ai verbi alla fine della frase, queste aspettative possono essere finalmente soddisfatte, ma devono essere recuperate dalla memoria in ordine inverso rispetto a quello in cui sono state create, secondo una disciplina di tipo LIFO (Last In, First Out), proprio come in uno stack di memoria.

La ricerca psicolinguistica ha dimostrato in modo consistente che il center-embedding profondo è estremamente difficile da processare per i parlanti umani. Studi classici condotti da George Miller negli anni Sessanta hanno mostrato che anche parlanti nativi altamente istruiti hanno difficoltà enormi con frasi che contengono più di due livelli di center-embedding. Questo fenomeno ha portato alcuni linguisti a proporre che esistano limiti cognitivi fondamentali sulla complessità sintattica che può essere effettivamente utilizzata nella comunicazione linguistica quotidiana, anche se tali strutture sono teoricamente grammaticali secondo le regole della grammatica formale.

Al contrario, la tail-recursion, chiamata anche ricorsione di destra o right-branching recursion, comporta l'aggiunta di materiale ricorsivo alla fine della struttura esistente, senza

interrompere la continuità tra gli elementi principali. L'esempio canonico è: "This is the house that Jack built", che in italiano corrisponde a "Questa è la casa che Giacomo costruì". Questa frase può essere espansa indefinitamente con la stessa facilità: "This is the malt that lay in the house that Jack built" (Questo è il malto che giaceva nella casa che Giacomo costruì), e così via.

La differenza fondamentale dal punto di vista del processamento cognitivo è che nella tail-recursion non è necessario mantenere in memoria aspettative non soddisfatte mentre si processa materiale annidato. Ogni clausola può essere completamente processata e integrata semanticamente prima di passare alla clausola successiva. Non vi è accumulo di dipendenze non risolte, e quindi non vi è sovraccarico dello stack della memoria di lavoro. Per questo motivo, le strutture con tail-recursion sono molto più facili da comprendere e produrre, anche quando raggiungono livelli di annidamento considerevoli.

Questa differenza nella processabilità tra center-embedding e tail-recursion ha importanti implicazioni teoriche. Alcuni ricercatori hanno argomentato che i limiti sul center-embedding dimostrano che la competenza linguistica teorica (la conoscenza grammaticale astratta) deve essere distinta dalla performance linguistica (l'uso effettivo del linguaggio in condizioni reali). Secondo questa visione, le regole grammaticali permettono center-embedding arbitrariamente profondo, ma fattori di performance legati ai limiti della memoria di lavoro impediscono l'uso effettivo di tali strutture oltre una certa profondità.

Altri ricercatori, tuttavia, hanno proposto che i limiti sul center-embedding dovrebbero essere incorporati direttamente nella teoria grammaticale, piuttosto che essere relegati al dominio della performance. Secondo questa prospettiva, una teoria grammaticale adeguata dovrebbe prevedere non solo quali strutture sono possibili in linea di principio, ma anche quali strutture sono effettivamente utilizzabili dai parlanti reali in condizioni normali di comunicazione.

1.5 Evidenza Cross-Linguistica della Ricorsione

La manifestazione della ricorsione sintattica varia considerevolmente attraverso le diverse lingue del mondo, offrendo una finestra preziosa sulla natura universale di questo fenomeno e sulle sue realizzazioni parametriche specifiche. L'esame comparativo delle strategie ricorsive in lingue tipologicamente diverse permette di distinguere ciò che è veramente universale nella facoltà linguistica umana da ciò che è specifico delle singole lingue o famiglie linguistiche.

1.5.1 Italiano: La Ricchezza delle Subordinate Multiple

L'italiano, come le altre lingue romanze, esibisce un sistema particolarmente ricco e articolato di subordinazione ricorsiva. La lingua italiana dispone di una gamma notevole di congiunzioni subordinanti che permettono di creare strutture annidate complesse mantenendo la chiarezza semantica e la relativa facilità di processamento.

Consideriamo un esempio di subordinazione multipla in italiano: "Maria pensa che Giovanni creda che Lucia sappia che Paolo ha mentito quando ha detto che non era a casa". Questa frase contiene cinque livelli di annidamento subordinato, eppure rimane comprensibile con

uno sforzo cognitivo relativamente moderato. La ragione di questa relativa facilità sta nella struttura prevalentemente right-branching (tail-recursive) della subordinazione italiana.

L'italiano permette anche costruzioni con center-embedding, specialmente attraverso le proposizioni relative. Una frase come "Il libro che lo studente che il professore che tutti stimano raccomandò comprò è esaurito" è grammaticalmente corretta ma cognitivamente molto impegnativa. Qui vediamo tre livelli di center-embedding: "il libro è esaurito" viene interrotto da "lo studente comprò", che viene interrotto da "il professore raccomandò", che a sua volta viene interrotto da "tutti stimano".

Un aspetto interessante dell'italiano è l'uso del modo congiuntivo nelle proposizioni subordinate, che fornisce informazioni morfologiche aggiuntive sulla struttura sintattica. Frasi come "Dubito che Maria pensi che Giovanni creda che Lucia sappia la verità" utilizzano il congiuntivo ("pensi", "creda", "sappia") per segnalare la natura subordinata e ipotetica delle clausole annidate. Questo arricchimento morfologico può facilitare il parsing di strutture complesse fornendo indizi supplementari sulla struttura gerarchica.

1.5.2 Tedesco: I Verbi Annidati a Fine Clausola

Il tedesco presenta caratteristiche sintattiche particolarmente interessanti per lo studio della ricorsione, dovute principalmente alla posizione dei verbi nelle clausole subordinate. In tedesco standard, il verbo principale di una clausola subordinata appare tipicamente alla fine della clausola stessa, creando configurazioni in cui verbi di clausole annidate successive si accumulano alla fine della struttura complessiva.

Consideriamo l'esempio tedesco: "Ich glaube, dass Hans meint, dass Maria denkt, dass Paul gelogen hat" (letteralmente: "Io credo che Hans pensa che Maria pensa che Paolo mentito ha"). In questa frase, i verbi delle clausole subordinate ("meint", "denkt", "hat") appaiono dopo i loro complementi, creando una struttura dove l'informazione verbale si accumula progressivamente verso la fine.

Quando si ha center-embedding in tedesco, la situazione diventa ancora più interessante. Una frase come "Der Mann, den der Junge, den das Mädchen kennt, sieht, kommt" (letteralmente: "L'uomo che il ragazzo che la ragazza conosce vede viene") mostra come i verbi delle clausole relative annidate ("kennt", "sieht") si raggruppino insieme, seguiti dal verbo della clausola principale ("kommt"). Questa configurazione crea una sequenza di verbi alla fine della frase che deve essere processata in modo ricorsivo per ricostruire correttamente le relazioni sintattiche e semantiche.

Studi psicolinguistici sui parlanti nativi tedeschi hanno mostrato che anche per loro queste strutture con center-embedding profondo sono difficili da processare, sebbene i parlanti tedeschi mostrino una certa maggiore tolleranza per tali costruzioni rispetto ai parlanti di lingue con verbi in posizione intermedia, probabilmente a causa dell'esposizione più frequente a pattern di verbi finali.

Un fenomeno particolarmente interessante in tedesco è quello chiamato "Ersatzinfinitiv" o infinito sostitutivo, che si verifica in certe costruzioni con verbi modali annidati. In frasi come "Er hat das Buch lesen wollen müssen" (letteralmente: "Egli ha il libro leggere volere dovere" = "Egli ha dovuto voler leggere il libro"), vediamo una sequenza di infiniti che rappresenta

l'annidamento di verbi modali. Questo fenomeno illustra come la morfologia verbale interagisca con la struttura ricorsiva in modi specifici della lingua.

1.5.3 La Controversia di Pirahã: Un Caso Limite

Il caso della lingua Pirahã, parlata da una piccola comunità indigena nell'Amazzonia brasiliana, ha generato uno dei dibattiti più accesi nella linguistica contemporanea riguardo alla natura universale della ricorsione. Nel 2005, l'antropologo e linguista Daniel Everett pubblicò un articolo in cui sosteneva che il Pirahã manca completamente di ricorsione sintattica, contraddicendo così l'ipotesi chomskyana che la ricorsione sia una proprietà universale e necessaria del linguaggio umano.

Secondo Everett, il Pirahã non possiede proposizioni relative, subordinate complementari, o altre costruzioni che permetterebbero l'embedding di una clausola all'interno di un'altra. Tutte le strutture complesse in Pirahã sarebbero costruite attraverso la coordinazione di clausole semplici giustapposte, piuttosto che attraverso l'embedding ricorsivo. Per esempio, dove l'inglese userebbe una proposizione relativa come "The man who killed the fish came" (L'uomo che uccise il pesce venne), il Pirahã userebbe una costruzione parattatica equivalente a "The man killed the fish. He came" (L'uomo uccise il pesce. Egli venne).

Everett collega questa presunta assenza di ricorsione alla cultura Pirahã, caratterizzata da quello che lui chiama il "Principio dell'Esperienza Immediata", secondo cui i Pirahã parlano solo di eventi che loro stessi hanno esperito direttamente o che sono stati riferiti da testimoni diretti viventi. Secondo questa interpretazione, la mancanza di ricorsione non sarebbe una limitazione cognitiva, ma piuttosto una conseguenza delle restrizioni culturali su ciò che può essere espresso linguisticamente.

Le affermazioni di Everett hanno incontrato un'opposizione vigorosa da parte di molti linguisti. Alcuni ricercatori, inclusi alcuni chomskiani, hanno contestato le sue analisi grammaticali, argomentando che costruzioni che Everett descrive come coordinate potrebbero in realtà essere subordinate incorporate. Altri hanno messo in discussione le sue trascrizioni e traduzioni, suggerendo interpretazioni alternative dei dati.

Nel 2007, Nevins, Pesetsky e Rodrigues pubblicarono una critica dettagliata del lavoro di Everett, argomentando che le sue conclusioni erano basate su analisi difettose e che in realtà il Pirahã mostra evidenza di ricorsione sintattica, sebbene forse non nelle forme più familiari alle lingue indoeuropee. Essi sostenevano che certe costruzioni in Pirahã che Everett descriveva come semplici erano in realtà sintatticamente complesse e coinvolgevano embedding.

La questione è complicata dal fatto che Everett è stato per lungo tempo l'unico linguista ad avere accesso completo alla comunità Pirahã e a parlare fluentemente la lingua. Questo ha reso difficile la verifica indipendente delle sue analisi. Negli anni successivi, altri ricercatori hanno avuto accesso limitato alla comunità, ma il dibattito rimane irrisolto.

Dal punto di vista teorico, il caso Pirahã solleva questioni fondamentali. Se davvero esistesse una lingua umana senza ricorsione, ciò invaliderebbe l'ipotesi che la ricorsione sia una proprietà universale e necessaria del linguaggio umano. Tuttavia, bisognerebbe anche spiegare come i bambini Pirahã, che presumibilmente possiedono la stessa dotazione

biologica per il linguaggio di tutti gli altri bambini umani, finiscano per acquisire un sistema linguistico diverso in questo aspetto fondamentale.

Una possibilità è che la ricorsione sia una proprietà della facoltà linguistica universale, ma che possa rimanere non espressa in particolari lingue a causa di fattori culturali o comunicativi. Un'analogia potrebbe essere con la scrittura: tutti gli esseri umani hanno la capacità biologica di sviluppare sistemi di scrittura, ma non tutte le culture hanno storicamente sviluppato tale tecnologia. Similmente, la capacità ricorsiva potrebbe essere presente ma non utilizzata in certe lingue.

Un'altra interpretazione è che il dibattito su Pirahã riveli che la nozione di "ricorsione" stessa necessita di essere precisata ulteriormente. Forse esistono diversi tipi o gradi di ricorsione, e ciò che distingue Pirahã non è l'assenza totale di qualsiasi forma di ricorsione, ma piuttosto l'assenza di certe manifestazioni sintattiche specifiche di ricorsione che sono comuni in molte altre lingue.

1.6 Formalismo: Context-Free Grammar

La teoria delle grammatiche formali fornisce gli strumenti matematici necessari per caratterizzare precisamente la natura della ricorsione sintattica. Tra le diverse classi di grammatiche formali identificate da Chomsky nella gerarchia che porta il suo nome, le grammatiche libere dal contesto (Context-Free Grammars, CFG) occupano un ruolo centrale nella modellizzazione delle lingue naturali.

1.6.1 Definizione Formale e Proprietà

Una grammatica libera dal contesto è definita formalmente come una quadrupla $G = (N, T, P, S)$ dove: N è un insieme finito di simboli non terminali (categorie sintattiche come S per frase, NP per sintagma nominale, VP per sintagma verbale, ecc.); T è un insieme finito di simboli terminali (le parole effettive della lingua); P è un insieme finito di regole di produzione della forma $A \rightarrow \alpha$, dove A è un simbolo non terminale e α è una stringa di simboli terminali e non terminali; S è il simbolo iniziale (tipicamente S per sentence/frase), appartenente a N .

La caratteristica definitoria delle grammatiche libere dal contesto è che il lato sinistro di ogni regola di produzione consiste di un singolo simbolo non terminale. Questo significa che la possibilità di applicare una regola dipende solo dalla presenza di quel particolare non terminale, indipendentemente dal contesto in cui appare. Questa proprietà rende le CFG computazionalmente trattabili pur essendo sufficientemente espressive per catturare molte delle strutture sintattiche delle lingue naturali.

Per illustrare come le CFG catturano la ricorsione, consideriamo un semplice esempio di grammatica che genera frasi con proposizioni relative:

$S \rightarrow NP VP$ $NP \rightarrow Det N$ $NP \rightarrow Det N PP$ $NP \rightarrow Det N RC$ $VP \rightarrow V NP$ $PP \rightarrow P NP$ $RC \rightarrow$ che S

Queste regole includono due istanze di ricorsione. Prima, la regola $PP \rightarrow P NP$ contiene NP sul lato destro, e poiché abbiamo la regola $NP \rightarrow Det N PP$, otteniamo un ciclo ricorsivo: NP può contenere PP , che può contenere NP , che può contenere PP , e così via. Questo

permette di generare frasi come "Il libro sulla scrivania nella camera in quella casa" con sintagmi preposizionali annidati arbitrariamente.

Seconda, e più rilevante per la nostra discussione, la regola $RC \rightarrow$ che S crea ricorsione perché S si espande a NP VP, e NP può contenere RC tramite la regola $NP \rightarrow Det N RC$, chiudendo il ciclo ricorsivo: S può contenere NP, che può contenere RC, che contiene S.

1.6.2 Derivazioni e Alberi Sintattici

Una derivazione in una CFG è una sequenza di applicazioni di regole di produzione che parte dal simbolo iniziale S e termina in una stringa di soli terminali. Consideriamo la derivazione della frase "Il gatto che il cane vide scappò":

$S \rightarrow NP VP \rightarrow Det N RC VP \rightarrow Il\ gatto\ RC\ VP \rightarrow Il\ gatto\ che\ S\ VP \rightarrow Il\ gatto\ che\ NP\ VP\ VP$
 $\rightarrow Il\ gatto\ che\ Det\ N\ VP\ VP \rightarrow Il\ gatto\ che\ il\ cane\ VP\ VP \rightarrow Il\ gatto\ che\ il\ cane\ V\ NP\ VP \rightarrow Il$
 $gatto\ che\ il\ cane\ vide\ NP\ VP \rightarrow Il\ gatto\ che\ il\ cane\ vide\ (\epsilon)\ VP \rightarrow Il\ gatto\ che\ il\ cane\ vide\ V$
 $\rightarrow Il\ gatto\ che\ il\ cane\ vide\ scappò$

Qui (ϵ) rappresenta un NP vuoto o trace, necessario per catturare il fatto che l'oggetto del verbo "vide" è co-referente con "il gatto" nella clausola principale. Questa derivazione illustra come le regole ricorsive vengano applicate per generare la struttura annidata.

La rappresentazione più intuitiva della struttura generata da una CFG è l'albero sintattico (parse tree). In un albero sintattico, il nodo radice è etichettato con il simbolo iniziale S, le foglie sono etichettate con simboli terminali (le parole della frase), e i nodi interni sono etichettati con simboli non terminali. Ogni nodo interno e i suoi figli corrispondono a un'applicazione di una regola di produzione.

Per la frase precedente, l'albero sintattico mostrerebbe chiaramente la struttura annidata: un nodo S principale domina un NP complesso (che contiene una RC) e un VP. Il nodo RC contiene a sua volta un intero S subordinato, che ha la propria struttura interna NP-VP. Questa rappresentazione ad albero rende visivamente evidente la natura gerarchica e ricorsiva della struttura sintattica.

1.6.3 Potere Espressivo e Limiti delle CFG

Le grammatiche libere dal contesto sono più potenti delle grammatiche regolari (che corrispondono agli automi a stati finiti) ma meno potenti delle grammatiche sensibili al contesto. Questo le colloca nel punto intermedio della gerarchia di Chomsky, rendendole adatte per modellare molti aspetti delle lingue naturali.

Un vantaggio importante delle CFG è che esistono algoritmi efficienti per il parsing, cioè per determinare se una data stringa appartiene al linguaggio generato dalla grammatica e per costruire il suo albero sintattico. L'algoritmo CYK (Cocke-Younger-Kasami) e l'algoritmo di Earley sono due esempi classici che operano in tempo polinomiale.

Tuttavia, le CFG non sono sufficientemente potenti per catturare tutti gli aspetti delle lingue naturali. Alcuni fenomeni linguistici richiedono sensibilità al contesto. Per esempio, l'accordo a lunga distanza in frasi come "I ragazzi che la ragazza ha visto sono arrivati" richiede che il verbo "sono" concordi in numero con "ragazzi", non con "ragazza", nonostante "ragazza" sia

sintatticamente più vicino. Questo tipo di dipendenza non può essere catturato direttamente da una CFG pura.

Un altro limite delle CFG emerge quando consideriamo costruzioni come le subordinate intrecciate (cross-serial dependencies) presenti in lingue come l'olandese e lo svizzero tedesco. In olandese, frasi come "Ik laat Jan Piet Marie zien helpen" (letteralmente: "Io lascio Jan Piet Marie vedere aiutare" = "Io lascio Jan aiutare Piet a vedere Marie") mostrano una struttura dove i verbi alla fine della frase devono concordare con i sintagmi nominali all'inizio secondo un pattern intrecciato che non può essere generato da una CFG.

Per gestire questi fenomeni, sono state proposte estensioni delle CFG. Le grammatiche mildly context-sensitive, come le Tree Adjoining Grammars (TAG) e le Combinatory Categorical Grammars (CCG), mantengono buone proprietà computazionali pur essendo più espressive delle CFG pure. Questi formalismi incorporano meccanismi che permettono di catturare dipendenze a lunga distanza mantenendo la trattabilità algoritmica.

1.7 Implementazione Computazionale: Parsing Ricorsivo

Il parsing sintattico è il processo di analisi di una stringa di parole per determinare la sua struttura grammaticale secondo una data grammatica. L'implementazione computazionale del parsing ricorsivo fornisce insights preziosi sulla natura della ricorsione sintattica e sulla sua complessità computazionale.

7.1.1 Approcci Top-Down e Bottom-Up

Esistono due strategie fondamentali per il parsing di strutture ricorsive: top-down e bottom-up. Questi approcci differiscono nel modo in cui attraversano l'albero sintattico durante il processo di analisi.

Il parsing top-down inizia dal simbolo iniziale S e cerca di espandere le regole grammaticali per derivare la stringa di input. L'algoritmo procede "dall'alto verso il basso" nell'albero sintattico, partendo dalla radice e cercando di raggiungere le foglie (le parole della frase). Quando incontra un simbolo non terminale, il parser top-down sceglie una regola di produzione per quel non terminale e cerca di far combaciare il risultato con l'input rimanente. Se la scelta porta a un fallimento, il parser torna indietro (backtracking) e prova un'altra regola.

Consideriamo il parsing top-down della frase "Il gatto vide il cane". Il parser inizia con S e applica la regola $S \rightarrow NP VP$. Ora deve trovare un NP che corrisponda all'inizio dell'input. Prova $NP \rightarrow Det N$, che corrisponde a "Il gatto". Poi deve trovare un VP che corrisponda a "vide il cane". Applica $VP \rightarrow V NP$, dove V corrisponde a "vide" e NP deve corrispondere a "il cane", cosa che avviene applicando ancora $NP \rightarrow Det N$.

Il parsing bottom-up, al contrario, inizia dalle parole della frase (le foglie dell'albero sintattico) e cerca di costruire l'albero verso l'alto fino a raggiungere il simbolo iniziale S . L'algoritmo identifica gruppi di simboli che corrispondono al lato destro di qualche regola di produzione e li riduce al corrispondente simbolo non terminale del lato sinistro. Questo processo continua finché tutta la stringa non è stata ridotta al simbolo iniziale.

Per la stessa frase "Il gatto vide il cane", un parser bottom-up procederebbe così: riconosce "Il" come Det e "gatto" come N, quindi li riduce a NP usando la regola $NP \rightarrow Det\ N$. Riconosce "vide" come V. Riconosce "il" come Det e "cane" come N, li riduce a NP. Poi riduce "V NP" a VP usando $VP \rightarrow V\ NP$. Finalmente riduce "NP VP" a S usando $S \rightarrow NP\ VP$.

Entrambi gli approcci hanno vantaggi e svantaggi. Il parsing top-down può essere più intuitivo e naturale, rispecchiando il modo in cui potremmo pensare alla generazione di frasi. Tuttavia, può essere inefficiente per grammatiche con molte regole alternative per lo stesso non terminale, richiedendo molto backtracking. Il parsing bottom-up evita alcune di queste inefficienze ma può costruire sottostrutture che non fanno parte della soluzione finale.

7.1.2 Recursive Descent Parser: Un'Implementazione Elegante

Il recursive descent parser è un'implementazione particolarmente elegante del parsing top-down che sfrutta direttamente la struttura ricorsiva della grammatica attraverso funzioni ricorsive nel codice del parser. Ogni non terminale della grammatica corrisponde a una funzione nel programma, e la struttura ricorsiva delle regole grammaticali si riflette nelle chiamate ricorsive tra queste funzioni.

Consideriamo un esempio concreto. Supponiamo di voler implementare un parser per la grammatica semplificata seguente:

$S \rightarrow NP\ VP\ NP \rightarrow Det\ N\ NP \rightarrow Det\ N\ RC\ VP \rightarrow V\ VP \rightarrow V\ NP\ RC \rightarrow che\ S$

Un recursive descent parser per questa grammatica includerebbe funzioni come queste (qui presentate in pseudocodice leggibile):

funzione `parse_S()`: `NP = parse_NP()` se NP è nullo allora ritorna nullo `VP = parse_VP()` se VP è nullo allora ritorna nullo ritorna `crea_nodo_S(NP, VP)`

funzione `parse_NP()`: `Det = match("Det")` se Det è nullo allora ritorna nullo `N = match("N")` se N è nullo allora ritorna nullo // Prova a vedere se c'è una proposizione relativa `salva_posizione()` `RC = parse_RC()` se RC non è nullo allora ritorna `crea_nodo_NP(Det, N, RC)` altrimenti `ripristina_posizione()` ritorna `crea_nodo_NP(Det, N)`

funzione `parse_RC()`: se `parola_corrente()` non è "che" allora ritorna nullo `avanza()` `S = parse_S()` // CHIAMATA RICORSIVA! se S è nullo allora ritorna nullo ritorna `crea_nodo_RC(S)`

La chiamata ricorsiva nella funzione `parse_RC` è particolarmente significativa. Quando il parser incontra una proposizione relativa, chiama `parse_S` per analizzare la clausola subordinata, che a sua volta può chiamare `parse_NP`, che può chiamare `parse_RC`, creando così una catena di chiamate ricorsive che rispecchia esattamente la struttura ricorsiva della grammatica.

Questa corrispondenza diretta tra la struttura grammaticale e la struttura del codice rende i recursive descent parser particolarmente trasparenti e facili da comprendere e mantenere. Ogni funzione ha una responsabilità chiara e ben definita, corrispondente a un non terminale della grammatica.

Tuttavia, i recursive descent parser hanno alcune limitazioni. Non possono gestire grammatiche con ricorsione sinistra diretta, cioè regole della forma $A \rightarrow A \alpha$. Per esempio, se avessimo una regola $NP \rightarrow NP PP$ per permettere sintagmi preposizionali multipli, un recursive descent parser entrerebbe in un ciclo infinito chiamando ripetutamente `parse_NP` senza consumare alcun input. Questo problema può essere risolto trasformando la grammatica per eliminare la ricorsione sinistra, convertendola in ricorsione destra equivalente.

7.1.3 Gestione dell'Ambiguità Strutturale

Un problema significativo nel parsing delle lingue naturali è l'ambiguità strutturale, dove una stessa stringa di parole può avere più di un albero sintattico valido. Questo fenomeno è estremamente comune nelle lingue naturali e rappresenta una sfida importante per i sistemi di parsing.

Un esempio classico di ambiguità strutturale è la frase "Il professore vide lo studente con il telescopio". Questa frase ha almeno due interpretazioni strutturali: nella prima, "con il telescopio" modifica il verbo "vide", indicando lo strumento usato per vedere; nella seconda, "con il telescopio" modifica "lo studente", indicando che lo studente aveva un telescopio. Queste due interpretazioni corrispondono a due alberi sintattici diversi:

Struttura 1: [S [NP Il professore] [VP [V vide] [NP lo studente] [PP con il telescopio]]]
 Struttura 2: [S [NP Il professore] [VP [V vide] [NP [NP lo studente] [PP con il telescopio]]]]

Un parser completo deve essere in grado di identificare tutte le possibili strutture sintattiche per una frase ambigua. Algoritmi come il parser di Earley o il CYK parser sono in grado di gestire l'ambiguità costruendo una foresta di parse (parse forest), una rappresentazione compatta che codifica tutti i possibili alberi sintattici.

Nei sistemi pratici di elaborazione del linguaggio naturale, l'ambiguità viene tipicamente risolta usando informazioni probabilistiche. Le Probabilistic Context-Free Grammars (PCFG) assegnano probabilità alle regole di produzione, permettendo al parser di calcolare la probabilità di ciascun albero sintattico e di selezionare quello più probabile. Questo approccio ha avuto notevole successo nei sistemi di parsing statistico.

Un'altra tecnica moderna per gestire l'ambiguità coinvolge i parser neurali basati su reti neurali profonde. Questi sistemi apprendono rappresentazioni distribuite delle strutture sintattiche da grandi corpora annotati e possono effettuare decisioni di parsing basate su pattern complessi nel contesto linguistico che vanno oltre ciò che può essere catturato da regole grammaticali esplicite.

1.8 Implicazioni Cognitive e Psicolinguistiche

Lo studio della ricorsione sintattica ha profonde implicazioni per la nostra comprensione dei meccanismi cognitivi sottostanti al linguaggio umano. La ricerca psicolinguistica ha fornito evidenze significative su come i parlanti umani producono e comprendono strutture ricorsive, rivelando sia le capacità straordinarie del sistema linguistico umano sia i suoi limiti intrinseci.

1.2.1 Memoria di Lavoro e Processamento Ricorsivo

La memoria di lavoro gioca un ruolo cruciale nel processamento di strutture sintattiche ricorsive, specialmente nel caso del center-embedding. Numerosi studi hanno dimostrato che la difficoltà nel comprendere frasi con center-embedding profondo è direttamente correlata ai limiti della memoria di lavoro.

Il modello classico propone che quando incontriamo una clausola interrotta da un'altra clausola annidata, dobbiamo mantenere in memoria gli elementi della prima clausola mentre processiamo la seconda. Questo crea quello che viene chiamato "carico di integrazione" - la quantità di informazione che deve essere mantenuta attiva nella memoria di lavoro aspettando di essere integrata con materiale successivo.

Gibson, uno dei principali teorici in questo campo, ha proposto la Dependency Locality Theory per spiegare la difficoltà del processamento sintattico. Secondo questa teoria, il costo cognitivo di processare una frase dipende dalla distanza tra elementi sintatticamente dipendenti e dal numero di nuovi referenti discorsivi introdotti nel frattempo. Il center-embedding è particolarmente costoso perché separa elementi dipendenti (come un soggetto e il suo verbo) con materiale che introduce nuovi referenti, sovraccaricando la memoria di lavoro.

Esperimenti con tecniche di misurazione dei tempi di lettura hanno confermato queste predizioni. I lettori mostrano tempi di lettura significativamente più lunghi sulle parole che richiedono l'integrazione di dipendenze a lunga distanza, e questo effetto è amplificato quando la distanza include clausole annidate che introducono nuovi partecipanti.

Studi più recenti usando tecniche di neuroimaging come la risonanza magnetica funzionale (fMRI) hanno identificato le regioni cerebrali coinvolte nel processamento di strutture ricorsive. Aree come il giro frontale inferiore sinistro (area di Broca) e regioni parietali mostrano attivazione aumentata durante il processamento di frasi sintatticamente complesse con annidamento ricorsivo. Queste regioni sono note per essere coinvolte in compiti che richiedono memoria di lavoro e manipolazione di informazioni gerarchicamente strutturate.

1.2.2 Strategie di Parsing On-Line

Un aspetto affascinante della cognizione linguistica è che il parsing sintattico avviene in tempo reale mentre le parole vengono percepite, piuttosto che attendere che l'intera frase sia stata presentata. Questo parsing incrementale on-line impone vincoli aggiuntivi sul processamento di strutture ricorsive.

La ricerca sul parsing incrementale ha rivelato che i parlanti costruiscono interpretazioni parziali della struttura sintattica non appena possibile, basandosi su indizi lessicali, morfologici e prosodici. Quando incontrano materiale che suggerisce l'inizio di una clausola annidata, attivano aspettative su come quella clausola potrebbe concludersi e come si integrerà con la struttura principale.

Un fenomeno particolarmente interessante è quello del "garden path", dove un'interpretazione iniziale si rivela errata e deve essere rivista. Per esempio, in inglese la frase "The horse raced past the barn fell" inizialmente viene analizzata come se "raced" fosse il verbo principale, ma quando si arriva a "fell" si capisce che "raced past the barn" è

una proposizione relativa ridotta e "fell" è il vero verbo principale. Questo richiede una rianalisi costosa della struttura sintattica.

Nel contesto della ricorsione, gli effetti garden path possono essere particolarmente pronunciati quando segnali ambigui rendono incerta la profondità dell'annidamento o i confini delle clausole. La presenza di marcatori espliciti di subordinazione, come congiunzioni subordinanti o pronomi relativi, facilita enormemente il parsing riducendo l'ambiguità strutturale.

1.2.3 Sviluppo della Ricorsione nell'Acquisizione Linguistica

La questione di quando e come i bambini acquisiscono la capacità di produrre e comprendere strutture ricorsive è fondamentale per comprendere la natura innata versus appresa della ricorsione linguistica.

Le ricerche sull'acquisizione del linguaggio mostrano che i bambini iniziano a produrre frasi semplici coordinate molto presto, tipicamente intorno ai due anni di età. Tuttavia, la produzione di strutture genuinamente ricorsive con embedding appare significativamente più tardi, generalmente dopo i tre o quattro anni.

Le proposizioni relative sono tra le prime strutture ricorsive ad emergere nel linguaggio infantile, ma anche qui c'è variabilità. I bambini iniziano tipicamente con proposizioni relative semplici che modificano l'oggetto della clausola principale prima di padroneggiare proposizioni relative che modificano il soggetto o che sono esse stesse annidate all'interno di altre proposizioni relative.

Alcuni ricercatori hanno interpretato questo pattern di sviluppo come evidenza che la capacità ricorsiva è innata ma richiede maturazione e pratica per essere pienamente dispiegata. Altri hanno proposto che la ricorsione emerga dall'interazione di capacità cognitive più generali, come la capacità di rappresentare relazioni gerarchiche, che si sviluppano gradualmente durante l'infanzia.

Un aspetto intrigante è che i bambini sembrano comprendere strutture ricorsive prima di essere in grado di produrle spontaneamente. Esperimenti di comprensione hanno mostrato che bambini di tre anni possono interpretare correttamente frasi con proposizioni relative semplici anche se non producono ancora tali strutture nel loro linguaggio spontaneo. Questa dissociazione tra comprensione e produzione suggerisce che fattori di performance, come le limitazioni nella capacità di pianificazione del linguaggio, possano mascherare competenze sintattiche sottostanti più avanzate.

1.9 Ricorsione e Strutture Non Sintattiche

Sebbene la nostra discussione si sia finora concentrata sulla ricorsione sintattica, è importante notare che la ricorsione appare anche in altri livelli della struttura linguistica, dalla fonologia alla morfologia.

1.3.1 Ricorsione Fonologica

Nella fonologia, la struttura prosodica del linguaggio esibisce proprietà ricorsive. Le parole fonologiche possono essere combinate in frasi fonologiche, che a loro volta possono essere combinate in frasi intonative, creando una gerarchia prosodica. Inoltre, certe teorie fonologiche propongono che i piedi metrici (unità ritmiche) possano essere ricorsivamente annidati per catturare la struttura accentuale complessa di certe lingue.

Un esempio viene dalla teoria della struttura sillabica, dove alcune analisi propongono che le sillabe stesse abbiano struttura ricorsiva interna. L'onset (attacco) e la rima di una sillaba possono contenere gruppi consonantici complessi che mostrano organizzazione gerarchica interna, con certe consonanti che formano costituenti più stretti con altre.

1.3.2 Ricorsione Morfologica

In morfologia, la composizione di parole può essere ricorsiva. Parole composte possono contenere altre parole composte come loro costituenti. Per esempio, in tedesco è possibile creare composti molto lunghi come "Donaudampfschiffahrtsgesellschaftskapitän" (capitano della società di navigazione a vapore del Danubio), dove ciascun componente può essere esso stesso un composto.

In italiano, benché la composizione sia meno produttiva che in tedesco, vediamo ricorsione nella derivazione morfologica. Suffissi possono essere applicati ricorsivamente: "nazional-izza-zione" contiene prima la suffissazione con "-ale" (implicita in "nazionale"), poi "-izza-" (verbalizzazione), poi "-zione" (nominalizzazione). Ogni livello di suffissazione crea una nuova base per ulteriore suffissazione.

Questi esempi di ricorsione non sintattica suggeriscono che la ricorsione potrebbe essere un principio organizzativo generale del linguaggio umano, non limitato alla sintassi. Questo rafforza l'idea che la ricorsione sia una proprietà fondamentale e pervasiva della cognizione linguistica umana.

1.3.3 Ricorsione nella Struttura del Discorso

Oltre alla sintassi, alla fonologia e alla morfologia, la ricorsione si manifesta anche a livelli più ampi dell'organizzazione linguistica, in particolare nella struttura del discorso e nella narrativa. Quando analizziamo la struttura dei testi complessi, dalle conversazioni quotidiane ai romanzi letterari, scopriamo pattern ricorsivi che organizzano l'informazione in modi gerarchici e annidati.

La teoria della Rhetorical Structure Theory (RST), sviluppata da William Mann e Sandra Thompson negli anni Ottanta del Novecento, propone che i testi siano organizzati secondo relazioni retoriche che connettono unità di discorso in strutture gerarchiche. Queste strutture esibiscono proprietà ricorsive fondamentali: un'unità di discorso complessa può essere composta da unità più piccole, ciascuna delle quali può essere ulteriormente decomposta in unità ancora più piccole, creando una gerarchia potenzialmente profonda di relazioni retoriche.

La RST identifica numerose relazioni retoriche che possono connettere porzioni di testo, tra cui: elaborazione (dove un segmento fornisce dettagli aggiuntivi su un altro), spiegazione (dove un segmento spiega perché qualcosa è il caso), evidenza (dove un segmento fornisce

supporto per una claim), contrasto (dove due segmenti presentano informazioni contrastanti), e concessione (dove un segmento ammette qualcosa che potrebbe contraddire il punto principale). Ciascuna di queste relazioni può operare ricorsivamente: un'elaborazione può contenere un'ulteriore elaborazione, una spiegazione può contenere una sottospiegazione, e così via.

Per esempio, consideriamo la seguente struttura narrativa estesa: "Maria andò al mercato. Comprò delle mele. Le mele erano fresche perché erano state raccolte quella mattina. Le aveva raccolte Giovanni, che lavorava nella fattoria di suo padre. Suo padre, che era un agricoltore di terza generazione, aveva insegnato a Giovanni tutti i segreti della coltivazione delle mele. Questi segreti erano stati tramandati dal nonno di Giovanni, che li aveva a sua volta appresi dal proprio padre durante la Grande Depressione."

Questa sequenza di proposizioni può essere analizzata come una struttura gerarchica profondamente annidata dove ogni livello aggiunge elaborazione al livello precedente. La proposizione principale "Maria andò al mercato" è elaborata dalla proposizione "Comprò delle mele", che stabilisce cosa Maria fece specificamente al mercato. Questa seconda proposizione è a sua volta elaborata da "Le mele erano fresche perché erano state raccolte quella mattina", che fornisce una qualità delle mele e una spiegazione causale per quella qualità. Questa terza proposizione contiene una relazione causale che è ulteriormente elaborata da "Le aveva raccolte Giovanni, che lavorava nella fattoria di suo padre", che introduce informazione su chi raccolse le mele. Questa informazione su Giovanni è elaborata dalla proposizione su suo padre, che a sua volta è elaborata dalla proposizione sul nonno, creando una catena di elaborazioni annidate che si estende per sei livelli di profondità.

La rappresentazione formale di questa struttura in RST sarebbe un albero retorico dove il nodo radice rappresenta l'intero testo, e ogni nodo interno rappresenta una relazione retorica tra i suoi figli. La ricorsione è evidente nella struttura ad albero: nodi che rappresentano unità di discorso complesse dominano sottoalberi che rappresentano le loro componenti, e questi sottoalberi hanno la stessa struttura ricorsiva del loro genitore.

La narrazione di storie complesse, specialmente nelle tradizioni letterarie sofisticate, fa uso estensivo di ricorsione narrativa attraverso la tecnica dei "racconti nel racconto". Le "Mille e una notte" rappresentano forse l'esempio più celebre di questa tecnica: Sheherazade racconta al re una storia, all'interno della quale un personaggio racconta un'altra storia, all'interno della quale un altro personaggio racconta ancora un'altra storia, creando livelli multipli di narrazione annidata. In alcuni casi, queste storie annidate possono raggiungere quattro o cinque livelli di profondità.

Il "Decamerone" di Boccaccio presenta una struttura simile ma più complessa. Il frame narrativo esterno descrive un gruppo di giovani che fuggono da Firenze durante la peste nera e si intrattengono raccontando storie. Ciascuna delle cento novelle costituisce un primo livello di embedding. Molte di queste novelle contengono a loro volta personaggi che raccontano storie (secondo livello), e alcune di queste storie interne contengono ulteriori storie raccontate (terzo livello). Questa struttura ricorsiva non è solo un artificio letterario, ma riflette capacità cognitive fondamentali di rappresentazione gerarchica e di navigazione tra diversi livelli di realtà narrativa.

Un aspetto particolarmente interessante della ricorsione nel discorso riguarda i cosiddetti "frame narrativi" o "cornici narrative". Quando un narratore introduce una storia dicendo "Lasciate che vi racconti cosa mi successe l'anno scorso quando viaggiavo in India", stabilisce un frame narrativo che contiene la storia successiva. All'interno di quella storia, il narratore potrebbe incontrare un vecchio saggio che dice "Mio nonno mi raccontò sempre che nei tempi antichi...", introducendo un secondo frame narrativo annidato nel primo. All'interno di questa storia del nonno, potrebbe esserci un personaggio che dice "C'era una volta un re che...", introducendo un terzo frame narrativo. Questa capacità di tenere traccia di multipli frame narrativi sovrapposti richiede sofisticate abilità di gestione della memoria e di rappresentazione gerarchica.

Il fenomeno dei frame narrativi annidati si manifesta non solo nella letteratura scritta ma anche nelle tradizioni orali di molte culture. I cantastorie tradizionali in culture africane, asiatiche e sudamericane spesso impiegano strutture narrative ricorsive dove storie sono contenute all'interno di storie. Nelle tradizioni narrative dei nativi americani, per esempio, è comune che una storia di origine cosmica contenga storie su singoli eroi culturali, che a loro volta contengono storie su specifici animali totem o fenomeni naturali.

Dal punto di vista cognitivo, la gestione di frame narrativi multipli richiede quello che i psicologi chiamano "source monitoring" -- la capacità di tenere traccia dell'origine di diverse informazioni e di quale livello di realtà narrativa esse appartengano. Quando ascoltiamo o leggiamo una storia con tre livelli di frame annidati, dobbiamo continuamente monitorare: questa informazione viene dal narratore esterno? Dal personaggio nel primo livello? Dal personaggio nel secondo livello raccontato dal personaggio del primo livello? Errori nel source monitoring possono portare a confusione su quale livello della struttura narrativa stiamo processando.

Ricerche psicolinguistiche hanno mostrato che i lettori tengono traccia dei frame narrativi usando una rappresentazione mentale simile a uno stack. Quando entriamo in un nuovo frame narrativo (un personaggio inizia a raccontare una storia), "spingiamo" il frame corrente sullo stack e ci spostiamo nel nuovo frame. Quando quel frame termina (il personaggio finisce la sua storia), "tiriamo" via il frame dallo stack e ritorniamo al frame precedente. Questa struttura a stack è esattamente analoga a quella usata nel processamento del center-embedding sintattico, suggerendo meccanismi cognitivi condivisi per gestire ricorsione a diversi livelli linguistici.

Un'altra manifestazione di ricorsione nella struttura del discorso riguarda i pattern di coerenza e coesione testuale. La coesione si riferisce ai legami espliciti tra diverse parti del testo (come l'uso di pronomi anaforici, congiunzioni, e espressioni che segnalano relazioni logiche), mentre la coerenza si riferisce al senso complessivo di unità semantica del testo. Entrambe queste proprietà possono essere analizzate ricorsivamente.

Consideriamo un testo complesso come un saggio argomentativo. La struttura globale potrebbe consistere di un'introduzione, tre argomenti principali, e una conclusione. Ciascun argomento principale è a sua volta strutturato in una claim principale, evidenze di supporto, e una ricapitolazione. Le evidenze di supporto potrebbero consistere di molteplici sotto-argomenti, ciascuno con la propria struttura interna. Questa organizzazione gerarchica

ricorsiva è cruciale per la coerenza del testo: ogni livello della gerarchia contribuisce alla coerenza del livello immediatamente superiore.

Le relazioni di coerenza tra unità di discorso possono essere modellate formalmente usando la Segmented Discourse Representation Theory (SDRT), sviluppata da Nicholas Asher e Alex Lascarides. In SDRT, il significato di un discorso è rappresentato come una struttura ricorsiva dove unità di discorso semplici (corrispondenti approssimativamente a clausole) sono connesse da relazioni di coerenza per formare unità di discorso complesse, che possono poi essere connesse da ulteriori relazioni di coerenza per formare unità ancora più complesse. La ricorsione è built-in nella teoria: la regola per costruire rappresentazioni di discorso complesse si applica allo stesso tipo di oggetti che produce.

1.10 Prospettive Neuroscientifiche sulla Ricorsione**

Negli ultimi due decenni, l'avvento di tecniche avanzate di neuroimaging ha permesso ai ricercatori di investigare le basi neurali della ricorsione sintattica con un livello di dettaglio precedentemente impossibile. Questi studi hanno fornito insights preziosi su quali regioni cerebrali sono coinvolte nel processamento di strutture ricorsive e su come queste regioni interagiscono per rendere possibile la comprensione e la produzione di linguaggio gerarchicamente strutturato.

1.4.1 L'Area di Broca e il Network Frontoparietale

L'area di Broca, situata nel giro frontale inferiore sinistro del cervello (corrispondente approssimativamente alle aree di Brodmann 44 e 45), è stata tradizionalmente associata alla produzione del linguaggio fin dalle osservazioni cliniche pionieristiche di Paul Broca nel 1861. Broca descrisse due pazienti che, dopo danni a questa regione del cervello, mostravano gravi deficit nella produzione linguistica pur mantenendo relativamente intatta la comprensione. Tuttavia, ricerche più recenti hanno rivelato che questa regione gioca un ruolo molto più complesso e cruciale anche nella comprensione di strutture sintattiche complesse, specialmente quelle che coinvolgono ricorsione.

Studi seminali di risonanza magnetica funzionale (fMRI) condotti da Angela Friederici e colleghi al Max Planck Institute di Lipsia hanno dimostrato che l'area di Broca mostra attivazione aumentata durante il processamento di frasi con center-embedding rispetto a frasi sintatticamente più semplici. In un esperimento particolarmente illuminante pubblicato nel 2006, i ricercatori hanno presentato ai partecipanti tre tipi di frasi tedesche: frasi semplici senza embedding ("Der Junge lacht" - Il ragazzo ride), frasi con un livello di embedding ("Der Junge, den das Mädchen küsst, lacht" - Il ragazzo che la ragazza bacia ride), e frasi con due livelli di embedding ("Der Junge, den das Mädchen, das der Mann kennt, küsst, lacht" - Il ragazzo che la ragazza che l'uomo conosce bacia ride).

I risultati hanno mostrato un pattern chiaro: l'intensità dell'attivazione nell'area di Broca correla linearmente con la profondità dell'annidamento. Frasi con due livelli di embedding producevano attivazione significativamente maggiore rispetto a frasi con un livello, che a loro volta producevano maggiore attivazione rispetto a frasi semplici. Questo pattern di attivazione graduata suggerisce che l'area di Broca non è semplicemente "accesa" o "spenta" per il processamento sintattico, ma piuttosto mostra un'attivazione modulata dalla complessità computazionale della struttura da processare.

Particolarmente significativo è il fatto che questa correlazione tra profondità di embedding e attivazione neurale si mantiene anche quando si controllano altri fattori che potrebbero contribuire alla difficoltà di processamento, come la lunghezza totale della frase, il numero di parole tra elementi sintatticamente dipendenti, e la familiarità lessicale. Questo suggerisce che l'area di Broca è sensibile specificamente alla struttura gerarchica ricorsiva piuttosto che semplicemente alla difficoltà generale della frase.

Questa correlazione non è limitata all'area di Broca. Un network più ampio di regioni, incluse aree parietali posteriori (in particolare il lobulo parietale inferiore e il precuneo) e regioni prefrontali dorsolaterali, mostra pattern di attivazione simili. Questo network frontoparietale sembra costituire il substrato neurale per la gestione delle dipendenze sintattiche a lunga distanza e per il mantenimento di strutture gerarchiche nella memoria di lavoro durante il processamento del linguaggio.

Studi più recenti usando tecniche di analisi multivariata dei pattern (MVPA - Multi-Voxel Pattern Analysis) hanno permesso di decodificare informazioni più specifiche sull'attività neurale durante il processamento ricorsivo. In uno studio del 2015, Christian Brennan e colleghi hanno dimostrato che i pattern di attivazione nell'area di Broca non solo aumentano con la profondità di embedding, ma possono effettivamente essere usati per decodificare quale specifica struttura sintattica sta essendo processata. Usando algoritmi di machine learning addestrati sui pattern di attivazione fMRI, i ricercatori sono riusciti a distinguere con accuratezza superiore al caso quali delle diverse possibili strutture sintattiche annidate un partecipante stava leggendo in un dato momento.

Un risultato particolarmente interessante emerge dagli studi che confrontano il processamento di strutture con center-embedding versus tail-recursion. Come previsto sulla base dei dati comportamentali che mostrano maggiore difficoltà cognitiva per il center-embedding, le strutture con center-embedding producono attivazione significativamente maggiore nelle regioni frontoparietali rispetto alle strutture con tail-recursion di complessità strutturale equivalente.

In uno studio elegante condotto da Peter Hagoort e colleghi al Donders Institute nei Paesi Bassi, partecipanti olandesi hanno letto frasi con strutture center-embedded (come "De jongen die de man die de vrouw kust ziet loopt" - Il ragazzo che l'uomo che la donna bacia vede cammina) e frasi con strutture right-branching di lunghezza comparabile (come "De jongen loopt omdat de man ziet dat de vrouw kust" - Il ragazzo cammina perché l'uomo vede che la donna bacia). Nonostante entrambi i tipi di frasi avessero lo stesso numero di clausole e lunghezza simile, le frasi center-embedded producevano attivazione significativamente maggiore nel giro frontale inferiore sinistro e nelle regioni parietali. Questo suggerisce che il network frontoparietale è particolarmente coinvolto quando le richieste sulla memoria di lavoro sono elevate, come nel caso del center-embedding dove multiple dipendenze non risolte devono essere mantenute simultaneamente in memoria.

Ulteriori evidenze provengono da studi di elettroencefalografia (EEG) e magnetoencefalografia (MEG), tecniche che offrono risoluzione temporale molto superiore all'fMRI, sebbene con risoluzione spaziale inferiore. Questi studi hanno rivelato che il processamento di strutture ricorsive coinvolge pattern oscillatori specifici nella banda theta (4-8 Hz) e gamma (30-100 Hz). Le oscillazioni theta nel giro frontale inferiore sinistro

sembrano riflettere processi di chunking e sequencing necessari per costruire rappresentazioni sintattiche, mentre le oscillazioni gamma riflettono l'integrazione locale di informazioni sintattiche e semantiche.

Un risultato affascinante emerso da studi MEG è che la sincronizzazione tra oscillazioni theta in regioni frontali e oscillazioni gamma in regioni temporali posteriori aumenta durante il processamento di strutture ricorsive complesse. Questa sincronizzazione cross-frequenza potrebbe riflettere la comunicazione tra regioni frontali coinvolte nel controllo esecutivo e nella gestione della memoria di lavoro, e regioni temporali coinvolte nel recupero di informazioni lessicali e nella costruzione di rappresentazioni semantiche.

1.4.2 Lateralizzazione Emisferica

Una questione fondamentale riguarda la lateralizzazione delle funzioni ricorsive: queste capacità sono lateralizzate nell'emisfero sinistro, come molte altre funzioni linguistiche, o coinvolgono entrambi gli emisferi in modo più bilanciato?

L'evidenza disponibile da molteplici fonti suggerisce una forte lateralizzazione sinistra per il processamento della ricorsione sintattica. Studi neuropsicologici classici su pazienti con lesioni cerebrali focali hanno fornito le prime evidenze. Nina Dronkers, una neurologa dell'Università della California, ha condotto uno studio sistematico su 64 pazienti con danni cerebrali unilaterali, testando la loro capacità di comprendere frasi con vari gradi di complessità sintattica. I risultati hanno mostrato che danni all'emisfero sinistro, specialmente alle regioni frontoinferiori (area di Broca) e frontotemporali (fascicolo arcuato), producono deficit specifici e severi nella comprensione e produzione di strutture sintattiche complesse con embedding ricorsivo.

Particolarmente illuminante è stato uno studio di caso dettagliato su un paziente identificato come "Mr. C" che aveva subito un ictus che danneggiò selettivamente l'area di Broca sinistra, lasciando relativamente intatte le regioni circostanti. Mr. C mostrava una dissociazione interessante: poteva comprendere e produrre frasi semplici e frasi con tail-recursion con relativa facilità, ma mostrava deficit marcati con frasi che contenevano center-embedding. Per esempio, poteva comprendere "Il gatto che vidi scappò" ma aveva grande difficoltà con "Il gatto che il cane che chiamai inseguì scappò". Questo pattern di deficit selettivo suggerisce che l'area di Broca sinistra sia cruciale specificamente per gestire le richieste di memoria di lavoro associate al center-embedding.

Al contrario, lesioni comparabili nell'emisfero destro tendono a lasciare intatte queste capacità sintattiche. Pazienti con danni al giro frontale inferiore destro (l'omologo dell'area di Broca) generalmente non mostrano deficit nella comprensione di strutture ricorsive, sebbene possano mostrare deficit in altri aspetti della cognizione linguistica come la comprensione del discorso narrativo, l'interpretazione di metafore e ironia, e l'elaborazione di informazioni pragmatiche e contestuali.

Studi con stimolazione magnetica transcranica (TMS), una tecnica che permette di interferire temporaneamente e reversibilmente con il funzionamento di regioni cerebrali specifiche in partecipanti sani, hanno confermato e raffinato queste conclusioni. In uno studio condotto da Carlo Miniussi e colleghi all'Università di Brescia, partecipanti sani hanno eseguito un compito di giudizio di grammaticalità su frasi con diversi livelli di embedding sintattico mentre

ricevevano stimolazione TMS ripetitiva (rTMS) all'area di Broca sinistra, all'omologo destro, o a un sito di controllo.

I risultati hanno mostrato che la rTMS applicata all'area di Broca sinistra durante i compiti produceva aumenti significativi nei tempi di reazione e nei tassi di errore, specialmente per frasi con embedding profondo. L'effetto era dose-dipendente: maggiore era l'intensità della stimolazione, maggiore era l'interferenza osservata. Crucialmente, la stessa stimolazione applicata alla regione omologa nell'emisfero destro non produceva effetti comparabili sul processamento sintattico. Questo risultato fornisce evidenza causale (piuttosto che meramente correlazionale) del ruolo critico dell'emisfero sinistro nel processamento ricorsivo.

Tuttavia, sarebbe errato concludere che l'emisfero destro non giochi alcun ruolo nel processamento linguistico complesso. Alcune ricerche recenti suggeriscono un quadro più sfumato dove l'emisfero destro contribuisce ad aspetti complementari del processamento linguistico che supportano indirettamente la comprensione di strutture ricorsive.

Per esempio, studi di fMRI hanno mostrato che regioni nell'emisfero destro, incluso il giro temporale superiore destro, mostrano attivazione aumentata durante il processamento di frasi lunghe e sintatticamente complesse quando queste sono presentate con prosodia naturale (le variazioni di tono, ritmo, e accentazione che caratterizzano il parlato naturale). La prosodia fornisce indizi importanti sulla struttura sintattica: pause e cambiamenti di intonazione spesso segnalano confini tra clausole, aiutando l'ascoltatore a segmentare correttamente il flusso del parlato in unità sintattiche.

Lucia Fogassi e colleghi all'Università di Parma hanno dimostrato che pazienti con lesioni all'emisfero destro, pur mantenendo intatte le capacità sintattiche di base, mostrano deficit nell'uso di informazioni prosodiche per disambiguare strutture sintatticamente ambigue. Per esempio, quando presentati con una frase come "Il professore vide lo studente con il telescopio", questi pazienti hanno maggiore difficoltà rispetto ai controlli nell'usare pattern di intonazione per determinare se "con il telescopio" modifica "vide" o "lo studente".

Inoltre, l'emisfero destro sembra giocare un ruolo nell'integrazione del significato delle frasi sintatticamente complesse nel contesto discorsivo più ampio. Regioni temporali e frontali destre mostrano attivazione quando frasi devono essere interpretate alla luce del contesto narrativo precedente, o quando richiedono inferenze pragmatiche complesse. La lateralizzazione sinistra riguarda principalmente i meccanismi computazionali specificamente sintattici della ricorsione -- la costruzione e manipolazione di strutture gerarchiche -- mentre aspetti più generali dell'elaborazione del linguaggio che coinvolgono prosodia, pragmatica, e integrazione discorsiva possono coinvolgere entrambi gli emisferi in modo più bilanciato.

Studi recenti usando tecniche di connettività funzionale (che esaminano come l'attività in diverse regioni cerebrali è correlata nel tempo) hanno rivelato che durante il processamento di strutture sintattiche complesse, c'è aumentata comunicazione non solo all'interno dell'emisfero sinistro, ma anche tra emisferi. Specificamente, regioni frontali sinistre mostrano aumentata sincronizzazione con regioni temporali destre durante il processamento di frasi lunghe e sintatticamente complesse presentate con prosodia naturale. Questo suggerisce che il processamento ottimale di strutture ricorsive nel linguaggio naturale

richiede l'integrazione di informazioni elaborate primariamente nell'emisfero sinistro (sintassi) con informazioni elaborate primariamente nell'emisfero destro (prosodia, contesto).

1.4.3 Connettività Strutturale e Funzionale

Oltre a identificare quali regioni cerebrali sono attive durante il processamento ricorsivo, ricerche recenti hanno iniziato a investigare in dettaglio come queste regioni comunicano tra loro attraverso connessioni neurali. Questa ricerca sulla connettività cerebrale ha rivelato che il processamento efficace di strutture ricorsive dipende non solo dall'integrità di regioni specifiche, ma anche dalla robustezza e funzionalità delle connessioni tra queste regioni.

Tecniche di imaging della diffusione (Diffusion Tensor Imaging, DTI e tecniche più avanzate come HARDI - High Angular Resolution Diffusion Imaging) permettono di tracciare i fasci di materia bianca che connettono diverse regioni della corteccia cerebrale, rivelando l'architettura della connettività strutturale del cervello. Questi studi hanno identificato diversi fasci di fibre particolarmente importanti per il linguaggio e la sintassi.

Il fascicolo arcuato è forse il fascio più studiato nel contesto del linguaggio. Questo prominente fascio di fibre connette le regioni frontali coinvolte nella produzione del linguaggio (inclusa l'area di Broca) con le regioni temporali coinvolte nella comprensione (inclusa l'area di Wernicke). La robustezza di questo fascio, misurata attraverso metriche come l'anisotropia frazionale (FA - Fractional Anisotropy, che riflette l'organizzazione e integrità delle fibre neurali), correla con le abilità sintattiche degli individui.

In uno studio longitudinale particolarmente impressionante condotto da Sonja Kotz e colleghi al Max Planck Institute, 40 partecipanti adulti hanno eseguito una batteria di test sintattici che includevano comprensione di frasi con vari livelli di embedding, giudizi di grammaticalità, e compiti di ripetizione di frasi complesse. Hanno anche ricevuto scansioni DTI per caratterizzare la connettività strutturale del loro cervello. I risultati hanno mostrato che la FA nel segmento frontale del fascicolo arcuato sinistro correlava significativamente con la performance nei compiti sintattici, anche dopo aver controllato per intelligenza generale, memoria di lavoro verbale, e vocabolario.

Particolarmente interessante, la forza di questa correlazione era maggiore per i compiti che coinvolgevano strutture con center-embedding rispetto a compiti con strutture più semplici. Questo suggerisce che l'integrità del fascicolo arcuato è particolarmente importante per gestire le richieste computazionali del processamento ricorsivo profondo.

Oltre al fascicolo arcuato, altri fasci di materia bianca sono emersi come importanti per il processamento sintattico. Il fascicolo longitudinale superiore (SLF - Superior Longitudinal Fasciculus), che connette regioni frontali con regioni parietali, sembra essere particolarmente importante per aspetti della sintassi che coinvolgono memoria di lavoro e riordinamento di elementi. Il fascicolo uncinato, che connette regioni frontali con regioni temporali anteriori, è stato implicato nel processamento semantico e nell'integrazione sintassi-semantica.

Un risultato affascinante emerso da studi che combinano DTI con fMRI funzionale è che la forza della connettività strutturale tra regioni predice la forza della loro connettività funzionale durante compiti linguistici. In altre parole, individui con fasci più robusti che connettono l'area

di Broca con regioni parietali tendono a mostrare maggiore sincronizzazione nell'attività di queste regioni durante il processamento di frasi sintatticamente complesse.

Analisi di connettività funzionale, che esaminano la correlazione temporale nell'attività di diverse regioni cerebrali durante il processamento linguistico, hanno rivelato pattern complessi di interazione tra regioni. Durante la comprensione di frasi con ricorsione profonda, le regioni frontoinferiori mostrano aumentata sincronizzazione non solo con regioni parietali, ma anche con il giro temporale superiore posteriore, il giro temporale medio, e regioni prefrontali dorsolaterali.

Questa sincronizzazione sembra riflettere la coordinazione di diverse componenti funzionali necessarie per il processamento ricorsivo. Le regioni frontali potrebbero essere coinvolte nel controllo esecutivo e nella gestione strategica del processamento sintattico, decidendo quando applicare regole sintattiche e come risolvere ambiguità. Le regioni parietali potrebbero essere coinvolte nel mantenimento di rappresentazioni strutturali temporanee -- il buffering delle informazioni sintattiche mentre vengono costruite e manipolate. Le regioni temporali posteriori potrebbero essere coinvolte nel recupero di informazioni lessicali (le proprietà sintattiche e semantiche delle parole individuali) e nell'integrazione semantica incrementale mentre la struttura sintattica viene costruita.

Tecniche più avanzate di analisi della connettività, come la Dynamic Causal Modeling (DCM), permettono di andare oltre semplici correlazioni per inferire direzioni causali nella comunicazione tra regioni. Studi DCM sul processamento sintattico hanno suggerito un modello dove l'area di Broca esercita influenze top-down su regioni temporali posteriori durante il processamento di strutture sintattiche complesse. Queste influenze top-down potrebbero riflettere predizioni generate dalle regioni frontali su quale informazione lessicale e semantica è attesa, data la struttura sintattica costruita fino a quel punto.

Per esempio, quando processiamo "Il gatto che il cane...", dopo aver identificato la struttura come contenente una proposizione relativa con "il cane" come soggetto della clausola relativa, l'area di Broca potrebbe inviare segnali predittivi a regioni temporali che codificano per informazioni verbali, preparando queste regioni a processare un verbo transitivo che richiederà un oggetto (che sarà la traccia legata al testa della relativa, "il gatto").

1.4.4 Sviluppo Neurale della Ricorsione

La questione di come le basi neurali della ricorsione si sviluppino durante l'infanzia e l'adolescenza è di fondamentale importanza per comprendere sia la natura innata che appresa di questa capacità. Studi longitudinali che seguono bambini nel tempo mentre acquisiscono competenze sintattiche sempre più sofisticate hanno iniziato a fornire risposte a questa domanda cruciale.

Ricerche di neuroimaging su bambini presentano sfide metodologiche significative. I bambini piccoli hanno difficoltà a rimanere fermi nello scanner MRI per periodi prolungati, e le loro teste più piccole richiedono bobine e sequenze di imaging specializzate. Tuttavia, progressi tecnologici e protocolli sperimentali adattati ai bambini hanno reso possibili studi sempre più sofisticati.

Uno studio pioneristico condotto da Julie Schneider e colleghi alla McGill University ha usato fMRI per esaminare il processamento sintattico in bambini di età compresa tra 5 e 8 anni, adolescenti di 12-15 anni, e giovani adulti. I partecipanti hanno ascoltato frasi con diversi livelli di complessità sintattica mentre erano nello scanner, e i ricercatori hanno comparato i pattern di attivazione cerebrale tra i gruppi di età.

I risultati hanno mostrato che regioni frontali e parietali coinvolte nel processamento sintattico negli adulti sono già attive nei bambini di 5-8 anni che stanno processando le prime strutture sintattiche complesse che padroneggiano. Questo suggerisce che la base neurale per il processamento sintattico è presente relativamente presto nello sviluppo. Tuttavia, i pattern di attivazione nei bambini differivano in modi importanti da quelli osservati negli adulti.

Prima di tutto, i bambini tendevano a mostrare attivazione più diffusa e meno focale. Mentre gli adulti mostravano attivazione concentrata principalmente nel giro frontale inferiore sinistro e in specifiche regioni parietali, i bambini mostravano attivazione che si estendeva su aree più ampie della corteccia frontale e parietale. Questo pattern di attivazione più diffusa è tipico dei sistemi neurali immaturi ed è stato osservato anche nello sviluppo di altre funzioni cognitive come la memoria di lavoro e il controllo esecutivo.

Secondo, i bambini mostravano attivazione più bilaterale, coinvolgendo non solo l'emisfero sinistro ma anche regioni omologhe nell'emisfero destro in misura molto maggiore rispetto agli adulti. Con lo sviluppo e l'esperienza linguistica, questa attivazione diventa progressivamente più lateralizzata a sinistra e più focale, concentrandosi sempre più nelle regioni specifiche che supportano il processamento sintattico negli adulti.

Gli adolescenti del gruppo intermedio mostravano pattern di attivazione che erano in qualche modo intermedi tra i bambini e gli adulti: più focali e lateralizzati dei bambini, ma ancora più diffusi e bilaterali degli adulti. Questo suggerisce un processo di specializzazione e lateralizzazione che si estende ben oltre l'infanzia, continuando durante l'adolescenza.

Questo processo di specializzazione neurale per il linguaggio continua infatti per un periodo sorprendentemente lungo. Studi più recenti hanno mostrato che anche nella tarda adolescenza (16-18 anni) ci sono ancora cambiamenti nei pattern di attivazione durante il processamento sintattico, con continua focalizzazione e lateralizzazione. Alcuni aspetti della maturazione neurale del linguaggio potrebbero estendersi persino nei primi anni dell'età adulta.

Studi DTI su bambini e adolescenti hanno rivelato che i fasci di materia bianca rilevanti per il linguaggio continuano a maturare durante tutto lo sviluppo, un processo che si estende ben oltre l'infanzia. Il fascicolo arcuato, in particolare, mostra aumenti progressivi nell'anisotropia frazionale dall'infanzia attraverso l'adolescenza e nei primi anni adulti, riflettendo aumentata mielinizzazione (il processo attraverso cui gli assoni neurali vengono avvolti in guaine di mielina che aumentano la velocità di conduzione) e possibilmente anche riorganizzazione e potatura delle connessioni neurali.

In uno studio longitudinale impressionante, Elizabeth Sowell e colleghi alla UCLA hanno seguito 45 bambini dall'età di 5 anni fino ai 19 anni, scansionandoli con MRI strutturale ogni due anni. Hanno osservato cambiamenti drammatici nella materia bianca, con aumenti

progressivi nel volume della materia bianca in regioni frontali e temporali che sono cruciali per il linguaggio. Questi aumenti correlavano con miglioramenti nelle abilità linguistiche complesse, inclusa la comprensione di strutture sintattiche sofisticate.

La maturazione prolungata delle connessioni strutturali potrebbe spiegare perché alcune competenze sintattiche sofisticate, come la produzione e comprensione fluente di strutture con embedding multiplo, continuano a migliorare ben oltre la prima infanzia. Bambini piccoli (3-5 anni) producono tipicamente frasi semplici e coordinazioni, con occasionali proposizioni relative semplici. Bambini in età scolare (6-10 anni) padroneggiano proposizioni relative più complesse e iniziano a usare strutture subordinate più sofisticate. Adolescenti e giovani adulti continuano a raffinare queste abilità, diventando capaci di produrre e comprendere strutture sintattiche di complessità crescente.

Un aspetto particolarmente interessante dello sviluppo riguarda la relazione tra maturazione neurale e pratica linguistica. È chiaro che sia cambiamenti biologici maturazionali che esperienza e pratica linguistica contribuiscono allo sviluppo delle capacità sintattiche. Ma qual è il loro contributo relativo, e come interagiscono?

Evidenze da studi su bambini bilingui forniscono insights interessanti. Bambini che crescono esposti a due lingue fin dalla nascita mostrano pattern di sviluppo neurale che riflettono le richieste specifiche delle loro lingue. Per esempio, bambini che crescono parlando inglese e una lingua con ordine delle parole molto diverso (come giapponese o turco) mostrano attivazione aumentata e più diffusa in regioni frontali e parietali durante compiti sintattici in entrambe le lingue, rispetto a bambini monolingui. Questo suggerisce che gestire sistemi sintattici multipli richiede risorse neurali aggiuntive e promuove lo sviluppo di reti neurali più robuste e flessibili per il processamento sintattico.

Studi su bambini che apprendono una seconda lingua più tardi nella vita (dopo l'infanzia) mostrano pattern neurali diversi da quelli che apprendono due lingue simultaneamente dalla nascita. I late learners tendono a mostrare maggiore attivazione in regioni frontali prefrontali associate al controllo cognitivo e alla memoria di lavoro quando processano la seconda lingua, suggerendo che si appoggiano più su meccanismi cognitivi generali piuttosto che su meccanismi linguistici specializzati.

1.4.5 Plasticità Neurale e Recupero dopo Lesioni

Un aspetto affascinante della neuroscienza del linguaggio riguarda la plasticità neurale -- la capacità del cervello di riorganizzarsi in risposta a esperienza o danno. Studi su pazienti che hanno subito danni cerebrali alle regioni linguistiche e successivamente hanno mostrato recupero delle funzioni linguistiche forniscono insights preziosi sui meccanismi neurali del linguaggio e sulla capacità di plasticità del cervello adulto.

È ben documentato che i bambini piccoli che subiscono danni estensivi all'emisfero sinistro, anche includendo l'area di Broca, possono spesso recuperare funzioni linguistiche notevolmente buone. Questo recupero sembra coinvolgere la "presa in carico" delle funzioni linguistiche da parte dell'emisfero destro. Bambini che hanno subito emisferectomia sinistra (rimozione completa o disconnessione dell'emisfero sinistro) prima dei 5-6 anni di età possono sviluppare capacità linguistiche vicine alla normalità, sebbene spesso con deficit sottili che possono essere rilevati con test sensibili.

Questa capacità di compensazione interemisferica è molto più limitata negli adulti. Adulti che subiscono danni comparabili all'area di Broca tipicamente mostrano deficit persistenti nelle capacità sintattiche, specialmente per strutture complesse. Tuttavia, anche negli adulti c'è evidenza di plasticità e riorganizzazione.

Studi longitudinali su pazienti afasici (individui con disturbi del linguaggio causati da danno cerebrale) che ricevono terapia intensiva del linguaggio hanno mostrato che il recupero è associato a cambiamenti nei pattern di attivazione cerebrale. Caterina Breitenstein e colleghi all'Università di Münster hanno seguito pazienti con afasia dopo ictus per un periodo di 6 mesi durante i quali ricevevano terapia linguistica intensiva. Scansioni fMRI condotte prima, durante, e dopo la terapia hanno rivelato che il recupero delle funzioni linguistiche era associato non solo con aumentata attivazione in regioni perilesionali (aree vicine ma non danneggiate dall'ictus) nell'emisfero sinistro, ma anche con reclutamento di regioni omologhe nell'emisfero destro.

Interessantemente, i pattern di attivazione durante le fasi precoci del recupero differivano da quelli osservati in fasi più tardive. Nelle prime settimane dopo l'ictus, i pazienti che iniziavano a recuperare capacità linguistiche mostravano forte attivazione nell'emisfero destro. Nei mesi successivi, man mano che il recupero progrediva, l'attivazione nell'emisfero destro tendeva a diminuire mentre l'attivazione in regioni perilesionali dell'emisfero sinistro aumentava. Questo pattern suggerisce che l'emisfero destro può fornire supporto compensatorio iniziale, ma che il recupero ottimale a lungo termine coinvolge il ristabilimento di funzioni nell'emisfero sinistro.

Tuttavia, per compiti particolarmente complessi come il processamento di strutture con center-embedding profondo, anche pazienti che hanno mostrato buon recupero generale delle funzioni linguistiche spesso continuano a mostrare deficit. Questo suggerisce che ci sono limiti alla plasticità neurale nel cervello adulto, specialmente per funzioni cognitive di alto livello che richiedono circuiteria neurale altamente specializzata.

Studi su stimolazione cerebrale non invasiva (come la stimolazione transcranica a corrente diretta, tDCS, e la TMS ripetitiva) suggeriscono possibilità intriganti per facilitare il recupero dopo lesioni. Questi metodi possono modulare l'eccitabilità di regioni cerebrali specifiche, potenzialmente facilitando la riorganizzazione neurale. Alcuni studi hanno mostrato che tDCS applicata a regioni linguistiche può migliorare i risultati della terapia linguistica in pazienti afasici, specialmente quando combinata con pratica intensiva.

1.11 Ricorsione e Evoluzione del Linguaggio

La questione dell'origine evolutiva della ricorsione sintattica è uno dei problemi più affascinanti e controversi nella scienza cognitiva contemporanea. Comprendere come e perché la capacità ricorsiva sia emersa nella linea evolutiva umana ha implicazioni profonde non solo per la linguistica, ma anche per la nostra comprensione di cosa ci rende distintivamente umani e come la nostra specie ha sviluppato capacità cognitive senza precedenti nel regno animale.

1.11.1 L'Ipotesi dell'Exaptation

Una prospettiva influente propone che la ricorsione sintattica sia emersa come un'exaptation -- un tratto che originariamente si è evoluto per servire una funzione diversa e che è stato successivamente cooptato per un nuovo uso. Questo concetto, introdotto da Stephen Jay Gould ed Elizabeth Vrba, è diventato centrale nelle discussioni sull'evoluzione di tratti complessi che sembrano troppo sofisticati per essere emersi de novo attraverso selezione diretta.

Secondo questa visione, la capacità di rappresentare e manipolare strutture gerarchicamente organizzate potrebbe essersi originariamente evoluta per supportare altri domini cognitivi, come la pianificazione di azioni complesse, la navigazione spaziale, la cognizione sociale, o la cognizione tecnica (la capacità di produrre e usare strumenti).

La pianificazione di azioni complesse richiede la capacità di decomporre un obiettivo principale in sotto-obiettivi annidati gerarchicamente. Per esempio, l'obiettivo "costruire un riparo" richiede sotto-obiettivi come "raccogliere materiali", "preparare il sito", "assemblare la struttura", e "rendere impermeabile il rifugio". Ciascuno di questi sotto-obiettivi può essere ulteriormente decomposto: "raccogliere materiali" richiede "trovare rami adatti", "tagliare i rami alla lunghezza appropriata", "trasportare i rami al sito di costruzione", e così via. Questa struttura gerarchica di piani e sotto-piani condivide proprietà formali con la ricorsione sintattica.

Ricerche comparative su primati non umani hanno mostrato che alcune specie mostrano capacità rudimentali di pianificazione gerarchica. Scimpanzé in natura sono stati osservati mentre usano sequenze multi-passo per ottenere cibo: per esempio, prima ottenere un bastone adatto (che può richiedere spezzare un ramo e rimuovere foglie), poi usare il bastone per estrarre termiti da un termitaio. Questa sequenza mostra una struttura goal-subgoal che, sebbene molto più semplice della pianificazione umana, suggerisce precursori evolutivi di cognizione gerarchica.

Richard Byrne dell'Università di St. Andrews ha condotto analisi dettagliate di comportamenti di preparazione del cibo in gorilla di montagna. Questi gorilla mangiano piante con spine e altre difese, e devono eseguire sequenze elaborate di manipolazioni per preparare il cibo in modo sicuro. Byrne ha documentato sequenze che contengono fino a 7-8 passi discreti che devono essere eseguiti in un ordine particolare. Alcune di queste sequenze mostrano struttura gerarchica: certi gruppi di passi formano unità funzionali che possono essere eseguite in ordini diversi rispetto ad altri gruppi. Sebbene questa struttura gerarchica sia molto più semplice della sintassi umana, potrebbe rappresentare un precursore evolutivo della capacità di organizzare azioni in strutture annidate.

La navigazione spaziale complessa beneficia similmente dalla rappresentazione gerarchica dello spazio. Consideriamo il problema di navigare in un ambiente urbano complesso: l'obiettivo "andare al mercato" potrebbe essere decomposto in sotto-obiettivi come "uscire di casa", "camminare fino alla stazione del bus", "prendere il bus numero 7", "scendere alla quinta fermata", "camminare tre isolati verso nord", "girare a destra sulla via principale", "camminare fino al mercato". Ciascuno di questi sotto-obiettivi può essere ulteriormente decomposto in azioni più specifiche.

Studi su ratti mostrano che questi roditori rappresentano ambienti familiari in modi gerarchicamente organizzati. Quando un ratto naviga in un labirinto complesso che ha

esplorato ripetutamente, pattern di attivazione neurale nell'ippocampo (una struttura cerebrale cruciale per la navigazione spaziale) rivelano che il ratto rappresenta il percorso a livelli multipli di granularità: ci sono neuroni che codificano per specifiche posizioni locali, altri che codificano per segmenti di percorso più lunghi, e altri ancora che sembrano rappresentare l'intero itinerario a un livello astratto.

Alcuni ricercatori hanno suggerito che la stessa architettura computazionale che supporta questa rappresentazione gerarchica dello spazio e della navigazione potrebbe essere stata reclutata per supportare la sintassi gerarchica del linguaggio. L'ippocampo umano è noto per essere coinvolto non solo nella memoria spaziale ma anche in forme più astratte di memoria relazionale, e alcune ricerche suggeriscono collegamenti tra processamento spaziale e linguistico nel cervello umano.

Una terza possibilità particolarmente intrigante riguarda la cognizione sociale e la theory of mind -- la capacità di rappresentare gli stati mentali di altri individui e di ragionare su credenze, desideri, intenzioni, e conoscenze degli altri. La comprensione di situazioni sociali complesse può richiedere ragionamento ricorsivo del tipo "Io so che tu sai che io so che Maria pensa che Giovanni crede che...", creando livelli annidati di rappresentazioni di stati mentali.

Questa capacità di ricorsione nell'attribuzione di stati mentali è ben documentata negli esseri umani adulti e si sviluppa durante l'infanzia. Bambini piccoli (sotto i 3-4 anni) tipicamente falliscono compiti di "falsa credenza" che richiedono di rappresentare che qualcuno ha una credenza che differisce dalla realtà. Man mano che crescono, i bambini diventano capaci di gestire livelli sempre più profondi di attribuzione ricorsiva di stati mentali.

Evidenze comparative suggeriscono che alcuni primati non umani hanno capacità rudimentali di theory of mind. Scimpanzé sembrano capire che altri individui possono vedere cose diverse da loro (prospettiva visiva) e possono avere conoscenze diverse. Tuttavia, rimane controverso quanto profonda sia questa capacità negli scimpanzé e se includano genuina rappresentazione ricorsiva di stati mentali.

Michael Tomasello e colleghi al Max Planck Institute for Evolutionary Anthropology hanno condotto esperimenti eleganti che suggeriscono che mentre gli scimpanzé possono ragionare su cosa altri vedono e fanno in situazioni competitive, mostrano limitazioni nel ragionamento cooperativo ricorsivo del tipo che gli umani impiegano naturalmente. Questa differenza potrebbe riflettere non tanto un'assenza totale di theory of mind negli scimpanzé, quanto un'elaborazione meno profonda e meno ricorsiva.

1.11.2 Il Ruolo della Pressione Comunicativa

Un'altra prospettiva complementare enfatizza il ruolo della pressione comunicativa nella selezione per capacità ricorsive. Man mano che le società umane diventavano più complesse e le esigenze comunicative più sofisticate, ci sarebbe stata una pressione selettiva crescente per la capacità di esprimere pensieri sempre più articolati e complessi.

La ricorsione offre un vantaggio comunicativo cruciale: permette di esprimere un numero potenzialmente infinito di proposizioni distinte usando un insieme finito di elementi e regole. Senza ricorsione, il repertorio espressivo di un sistema comunicativo sarebbe drasticamente

limitato. Un sistema comunicativo basato solo su chiamate fisse, anche se queste potessero essere combinate in modi non ricorsivi, potrebbe esprimere solo un numero finito di messaggi distinti.

Per comprendere la portata di questo vantaggio, consideriamo un confronto quantitativo semplificato. Supponiamo un sistema di comunicazione che ha 100 elementi di base (parole o chiamate) e permette sequenze di fino a 10 elementi, ma senza possibilità di embedding ricorsivo. Il numero massimo di messaggi distinti che questo sistema può generare è approssimativamente 100^{10} (cento alla decima potenza), che sebbene sia un numero grande, è comunque finito e fissato.

Al contrario, un sistema con ricorsione può generare un numero potenzialmente infinito di messaggi. Anche con solo 100 elementi di base e regole combina torie relativamente semplici che permettono ricorsione, non c'è limite superiore al numero di messaggi distinti che possono essere generati. Possiamo sempre creare un messaggio più lungo e più complesso annidando ulteriormente la struttura.

Inoltre, la ricorsione permette l'espressione di relazioni logiche e temporali complesse che sono essenziali per la coordinazione di attività sociali sofisticate. La capacità di comunicare informazioni come "Il predatore che abbiamo visto ieri vicino al fiume che attraversa la valle dove troviamo le bacche rosse è tornato, quindi dovremmo andare oggi alla valle alternativa che ha l'acqua più fredda" richiede ricorsione sintattica per annidare le varie clausole relative, temporali, e locative che specificano con precisione tutti i dettagli rilevanti.

Senza ricorsione, comunicare la stessa informazione richiederebbe una sequenza di enunciazioni separate: "C'è un predatore. L'abbiamo visto ieri. Era vicino al fiume. Il fiume attraversa la valle. Nella valle troviamo bacche rosse. Il predatore è tornato. Dobbiamo andare alla valle alternativa. Quella valle ha acqua più fredda." Questa sequenza piatta di enunciazioni pone un carico maggiore sulla memoria del destinatario, che deve tenere attive tutte le proposizioni separate e inferire le relazioni tra loro, piuttosto che avere queste relazioni codificate esplicitamente nella struttura sintattica.

Secondo questa visione, individui con maggiori capacità ricorsive avrebbero avuto vantaggi selettivi significativi in termini di coordinazione sociale, condivisione di conoscenze, pianificazione cooperativa, e trasmissione culturale. Questi vantaggi avrebbero guidato la selezione per miglioramenti incrementali nella capacità ricorsiva nel corso delle generazioni.

Robin Dunbar, famoso per la sua ipotesi che la dimensione del gruppo sociale nelle specie di primati sia correlata alla dimensione della neocorteccia, ha proposto che il linguaggio umano si sia evoluto primariamente come meccanismo per mantenere coesione in gruppi sociali sempre più grandi. Secondo Dunbar, il grooming sociale (la spulciatura reciproca) funziona efficacemente per mantenere legami sociali in gruppi piccoli di primati, ma diventa impraticabile in gruppi grandi a causa dei vincoli di tempo. Il linguaggio, e specialmente il "gossip" (il discorso su persone assenti e sulle loro relazioni sociali), sarebbe emerso come meccanismo più efficiente per mantenere coesione sociale in gruppi grandi.

Crucialmente, il gossip efficace richiede capacità ricorsive: "Maria pensa che Giovanni stia pianificando di formare un'alleanza con Luca contro Paolo" implica attribuzione ricorsiva di stati mentali e richiede strutture sintattiche che possono catturare queste relazioni

complesse. Se questa prospettiva è corretta, la pressione selettiva per gestire relazioni sociali sempre più complesse in gruppi sempre più grandi avrebbe favorito lo sviluppo di capacità ricorsive sia nella cognizione sociale (theory of mind ricorsiva) che nella sintassi linguistica.

1.11.3 La Questione della Grammaticalizzazione e dell'Evoluzione Culturale

Un altro aspetto importante riguarda i meccanismi attraverso cui costruzioni ricorsive emergono e si consolidano nelle lingue, e come questo processo di cambiamento linguistico culturale interagisce con l'evoluzione biologica delle capacità cognitive sottostanti.

Studi di grammaticalizzazione -- il processo attraverso cui elementi lessicali con significato concreto e pieno diventano gradualmente elementi grammaticali con funzioni più astratte -- suggeriscono che molte strutture sintattiche complesse, incluse quelle ricorsive, emergono gradualmente attraverso cicli ripetuti di cambiamento linguistico culturale piuttosto che apparire de novo come innovazioni sintattiche radicali.

Per esempio, le proposizioni relative in molte lingue del mondo sembrano essersi sviluppate storicamente da costruzioni paratattiche (coordinate) attraverso un processo di grammaticalizzazione. Una sequenza originaria di due clausole separate come "Il gatto. Il cane lo inseguì. (Il gatto) scappò" potrebbe diventare "Il gatto, il cane lo inseguì, scappò" attraverso la semplice giustapposizione. Il pronome "lo" in questa costruzione intermedia serve come anaforico che si riferisce al gatto menzionato nella prima clausola.

Nel tempo, costruzioni come questa potrebbero essere reanalizzate come contenenti non due clausole indipendenti ma una clausola principale con una clausola relativa embedded. Il pronome anaforico potrebbe grammaticalizzarsi in un pronome relativo specializzato. In molte lingue, i pronomi relativi derivano storicamente da pronomi interrogativi o dimostrativi che hanno subito questo processo di grammaticalizzazione. In italiano, "che" come pronome relativo ha origini nel latino "quid" (cosa), che era originariamente un pronome interrogativo.

Questo processo di grammaticalizzazione può avvenire ripetutamente e ricorsivamente, creando cicli in cui strutture che inizialmente erano innovative e forse faticose da processare diventano gradualmente convenzionalizzate e automatizzate. Man mano che una generazione di parlanti usa frequentemente certe costruzioni ricorsive, la generazione successiva le acquisisce come pattern stabiliti e produttivi della lingua, potenzialmente aprendo spazio per l'innovazione di strutture ricorsive ancora più complesse.

Joan Bybee dell'Università del New Mexico ha proposto che questo processo di convenzionalizzazione attraverso la frequenza d'uso sia centrale all'evoluzione delle costruzioni grammaticali. Costruzioni che iniziano come combinazioni innovative di elementi lessicali, se usate ripetutamente, diventano gradualmente "chunked" -- cioè, memorizzate e processate come unità olistiche piuttosto che come combinazioni composizionali. Questa chunking riduce il carico di processamento, rendendo la costruzione più facile da produrre e comprendere, il che a sua volta aumenta la sua frequenza d'uso, creando un ciclo di feedback positivo.

Nel contesto della ricorsione, questo significa che una volta che una costruzione ricorsiva di base (come le proposizioni relative semplici) diventa ben stabilita e automatizzata, diventa

disponibile come "blocco costruttivo" che può essere usato ricorsivamente per generare costruzioni ancora più complesse. Per esempio, una volta che i parlanti padroneggiano proposizioni relative semplici, possono iniziare a sperimentare con proposizioni relative annidate, costruendo nuove strutture ricorsive su fondamenta già consolidate.

Questa prospettiva suggerisce che l'evoluzione della ricorsione sintattica potrebbe non essere stata un evento singolo e discreto, ma piuttosto un processo graduale e cumulativo che si è svolto attraverso due binari paralleli e interagenti: evoluzione biologica delle capacità cognitive che rendono possibile l'apprendimento e l'uso di strutture ricorsive, ed evoluzione culturale dei sistemi linguistici che sfruttano e elaborano queste capacità in modi sempre più sofisticati.

Questi due livelli -- biologico e culturale -- non sono indipendenti ma si influenzano reciprocamente in cicli di coevoluzione genetico-culturale. Capacità cognitive geneticamente influenzate rendono possibile l'apprendimento di certi pattern linguistici. Questi pattern, una volta stabiliti culturalmente, creano un ambiente di apprendimento che favorisce individui con varianti genetiche che facilitano l'apprendimento di quei pattern. Nel corso di molte generazioni, questa coevoluzione può portare all'evoluzione di capacità cognitive sempre più specializzate per il tipo di strutture linguistiche presenti nella lingua (o nelle lingue) della comunità.

Il modello dell'Iterated Learning, sviluppato da Simon Kirby, Kenny Smith e collaboratori all'Università di Edimburgo, fornisce un framework formale per comprendere questa coevoluzione. Attraverso simulazioni computazionali e esperimenti di laboratorio con catene di trasmissione culturale (dove ciò che una generazione apprende viene trasmesso alla generazione successiva), questi ricercatori hanno mostrato che sistemi di comunicazione inizialmente irregolari e idiosincratici tendono a evolversi verso maggiore sistematicità e composizionalità attraverso l'Iterated Learning.

Crucialmente, strutture recursive emergono naturalmente in questi sistemi quando c'è pressione per esprimere un numero di significati che eccede il numero di segnali di base disponibili. La ricorsione emerge come soluzione efficiente al problema di esprimere un numero potenzialmente infinito di significati usando risorse finite. Questo suggerisce che date le pressioni comunicative appropriate, la ricorsione potrebbe essere quasi inevitabile nell'evoluzione di sistemi di comunicazione complessi.

1.11.4 Confronti con la Comunicazione Animale

Per valutare la specialità della ricorsione sintattica umana e comprendere le sue origini evolutive, è cruciale confrontare sistematicamente le capacità linguistiche umane con i sistemi di comunicazione di altre specie. Questo confronto comparativo può aiutare a identificare cosa è veramente unico al linguaggio umano e cosa potrebbe essere condiviso con altri animali, fornendo indizi sulle origini evolutive delle capacità linguistiche distintamente umane.

Molti sistemi di comunicazione animale mostrano strutture combinatorie di qualche tipo. Per esempio, le chiamate di alcuni uccelli canori possono combinare elementi (note individuali o motivi) in sequenze complesse. I whales delle megattere producono "canzoni" elaborate che possono durare molti minuti e che mostrano struttura gerarchica con pattern ripetitivi a livelli

multipli. Alcune specie di primati usano sequenze di chiamate diverse per comunicare informazioni complesse sulle minacce nel loro ambiente.

Un esempio ben studiato riguarda le chiamate di allarme dei cercopitechi di Campbell (*Cercopithecus campbelli*), scimmie che vivono nelle foreste dell'Africa occidentale. Klaus Zuberbühler dell'Università di St. Andrews ha documentato che questi primati producono chiamate diverse per predatori diversi (leopardi versus aquile), e possono combinare queste chiamate in sequenze che sembrano modulare il significato. Per esempio, l'aggiunta di un prefisso "boom" prima di una chiamata di allarme per leopardo sembra trasformare il significato da "c'è un leopardo nelle vicinanze" (allarme urgente) a qualcosa come "ho sentito un leopardo lontano" o "possibile leopardo" (allarme meno urgente).

Tuttavia, sebbene questi esempi mostrino combinatorialità, tipicamente non mostrano le proprietà gerarchiche e genuinamente ricorsive che caratterizzano la sintassi umana. Le sequenze di chiamate negli animali tendono ad essere lineari piuttosto che gerarchicamente strutturate. Non ci sono chiari analoghi della differenza tra coordinazione e subordinazione, o dell'embedding di costituenti all'interno di costituenti dello stesso tipo.

Un caso particolarmente discusso e controverso riguarda il canto dello Storno comune (*Sturnus vulgaris*). In uno studio del 2006, Timothy Gentner e collaboratori all'Università della California San Diego hanno addestrato storni a distinguere tra due tipi di pattern di canto: pattern con struttura $A^n B^n$ (n ripetizioni di un tipo di motivo A seguite da n ripetizioni di un tipo di motivo B) versus pattern con struttura $(AB)^n$ (n ripetizioni della sequenza AB). La struttura $A^n B^n$ è interessante perché richiede, in linea di principio, il riconoscimento di dipendenze non adiacenti del tipo che eccedono le capacità delle grammatiche a stati finiti e che richiederebbero capacità almeno di tipo context-free.

Gentner e colleghi hanno riportato che gli storni potevano imparare questa discriminazione e generalizzavano correttamente a nuovi esempi, suggerendo che possiedono capacità di riconoscere dipendenze ricorsive. Questo risultato ha generato notevole eccitazione e controversia, poiché sembrava sfidare l'ipotesi che la ricorsione sia unica agli esseri umani.

Tuttavia, studi successivi hanno sollevato dubbi significativi su questa interpretazione. Carel ten Cate e colleghi all'Università di Leiden hanno replicato parzialmente l'esperimento ma hanno argomentato che gli storni potrebbero risolvere il compito usando strategie non ricorsive, come basarsi su semplici differenze acustiche tra i due tipi di sequenze o apprendere pattern specifici piuttosto che regole astratte. Hanno mostrato che piccioni, che nessuno considererebbe capaci di ricorsione, potevano risolvere versioni semplificate dello stesso compito, suggerendo che il successo degli storni non necessariamente implica capacità ricorsive genuine.

La controversia sugli storni illustra una difficoltà metodologica generale nello studio comparativo della ricorsione: è spesso difficile escludere definitivamente che animali stiano usando strategie più semplici piuttosto che genuina elaborazione ricorsiva per risolvere compiti che sembrano richiedere ricorsione. Il linguaggio umano fornisce evidenza molto più chiara di ricorsione perché mostra tutte le proprietà che ci aspetteremmo dalla ricorsione genuina: la produzione spontanea (non solo il riconoscimento) di strutture annidate, la generalizzazione a strutture nuove e arbitrariamente complesse, la sensibilità alle relazioni gerarchiche specifiche piuttosto che solo a pattern superficiali, e così via.

Un contrasto ancora più chiaro emerge quando confrontiamo il linguaggio umano con i sistemi di comunicazione dei nostri parenti evolutivi più prossimi, gli scimpanzé e i bonobo. Nonostante decenni di tentativi di insegnare forme di linguaggio simbolico a questi primati, sia attraverso linguaggi dei segni che attraverso sistemi di simboli visivi come i lexigrammi usati da Sue Savage-Rumbaugh con i bonobo, non vi è evidenza convincente che essi possano padroneggiare strutture ricorsive anche relativamente semplici.

Gli scimpanzé e bonobo addestrati intensivamente possono apprendere vocabolari considerevoli di centinaia di segni o simboli e possono combinarli in sequenze per comunicare richieste o descrivere situazioni. Tuttavia, queste sequenze sono tipicamente lineari e non mostrano la struttura gerarchica che caratterizza anche le produzioni più semplici di bambini umani di due o tre anni. Le sequenze prodotte da scimpanzé tendono ad essere del tipo "Dare mela me" o "Me uscire fuori", con gli elementi giustapposti linearmente piuttosto che organizzati gerarchicamente.

Anche quando gli addestratori hanno cercato esplicitamente di insegnare costruzioni che richiederebbero rappresentazione gerarchica, come proposizioni relative semplici, i primati non umani hanno mostrato difficoltà estreme e, nei pochi casi dove sembravano avere un certo successo, era dubbio se capissero la struttura gerarchica o semplicemente memorizzavano sequenze specifiche di simboli associate a situazioni specifiche.

Questa assenza di ricorsione nella comunicazione degli altri primati, nonostante le loro considerevoli capacità cognitive in molti altri domini (uso di strumenti, cognizione sociale, memoria, apprendimento), suggerisce che la ricorsione sintattica potrebbe veramente essere una caratteristica distintiva del linguaggio umano che non ha chiari analoghi in altre specie.

Tuttavia, resta aperta e dibattuta la questione se questa specialità derivi da limitazioni cognitive generali negli altri primati (per esempio, limitazioni della memoria di lavoro o della capacità di rappresentazione gerarchica) o da assenza specifica di meccanismi neurali specializzati per la sintassi ricorsiva. Alcune evidenze suggeriscono che primati non umani possono rappresentare gerarchie in contesti non linguistici (per esempio, gerarchie di dominanza sociale, o strutture gerarchiche di sequenze di azioni), il che suggerirebbe che l'assenza di ricorsione nel loro uso simbolico non è dovuta a un'incapacità generale di rappresentare gerarchie.

Una possibilità è che gli esseri umani abbiano evoluto meccanismi specializzati che permettono l'applicazione di capacità di rappresentazione gerarchica generale al dominio specifico della sintassi linguistica -- meccanismi che sono assenti o molto meno sviluppati in altre specie. Alternativamente, potrebbe essere che gli esseri umani abbiano capacità di rappresentazione gerarchica e di memoria di lavoro significativamente più potenti rispetto ad altri primati, e che la ricorsione sintattica sia un sottoprodotto naturale di queste capacità cognitive più generali quando applicate al linguaggio.

La risoluzione definitiva di queste questioni richiederà studi comparativi molto più dettagliati che controllino rigorosamente per strategie alternative e che testino sistematicamente le capacità di diverse specie in compiti linguistici e non linguistici che richiedono elaborazione gerarchica e ricorsiva. Solo attraverso tale lavoro comparativo sistematico potremo comprendere pienamente le origini evolutive della ricorsione e se rappresenta veramente

un'innovazione evolutiva unica agli esseri umani o piuttosto un'elaborazione quantitativa di capacità più generali condivise più ampiamente tra i vertebrati intelligenti.

CAPITOLO 2: SEMANTICA RICORSIVA

2.1 Fondamenti della Composizionalità Semantica

La semantica formale si occupa sistematicamente del significato delle espressioni linguistiche e dei principi che governano come questi significati si combinano per formare significati più complessi. Al cuore della semantica formale si trova il principio di composizionalità, tradizionalmente attribuito al filosofo e logico tedesco Gottlob Frege (1848-1925), sebbene formulazioni simili si possano trovare anche nel lavoro di altri filosofi e logici del diciannovesimo secolo. Secondo questo principio fondamentale, il significato di un'espressione complessa è una funzione sistematica e predicibile dei significati delle sue parti costituenti e del modo in cui queste parti sono combinate sintatticamente.

Questo principio, apparentemente semplice nella sua formulazione, ha implicazioni profonde e di vasta portata per la natura della ricorsione nel dominio semantico. Se il significato delle espressioni complesse è determinato composizionalmente -- cioè, se possiamo calcolare il significato del tutto conoscendo i significati delle parti e le regole di combinazione -- allora la ricorsione sintattica (la capacità di annidare strutture sintattiche all'interno di strutture dello stesso tipo) deve essere necessariamente accompagnata da una corrispondente ricorsione semantica (la capacità di computare il significato di espressioni annidate in modo sistematico e predicibile, applicando le stesse regole composizionali a livelli multipli di annidamento).

Il principio di composizionalità non è solo un postulato teorico astratto, ma ha motivazioni sia empiriche che teoriche profonde. Dal punto di vista empirico, la composizionalità spiega come i parlanti possano comprendere frasi che non hanno mai incontrato prima -- un fenomeno ubiquo nell'uso del linguaggio quotidiano. Se il significato di ogni frase dovesse essere appreso individualmente, il compito dell'acquisizione linguistica sarebbe praticamente impossibile dato il numero potenzialmente infinito di frasi possibili. La composizionalità risolve questo problema riducendo il compito di apprendimento: invece di apprendere significati per un numero infinito di frasi, i parlanti apprendono significati per un numero finito di parole e un insieme finito di regole composizionali, che poi possono applicare ricorsivamente per comprendere e produrre un numero illimitato di espressioni nuove.

Dal punto di vista teorico, la composizionalità fornisce una spiegazione elegante e parsimoniosa di come sistemi finiti (cervelli umani con risorse cognitive finite) possano padroneggiare sistemi infiniti (lingue naturali con infiniti enunciati possibili). Questo è un caso particolare del più generale principio dell'"uso infinito di mezzi finiti" che Wilhelm von Humboldt identificò come caratteristica definitoria del linguaggio umano nel diciannovesimo secolo.

2.1.1 Il Principio di Composizionalità nella Pratica

Per comprendere come opera concretamente il principio di composizionalità, esaminiamo in dettaglio l'interpretazione di una frase semplice come "Il gatto dorme". Secondo una

semantica compositiva standard nella tradizione di Richard Montague, questa frase riceve la sua interpretazione attraverso i seguenti passi sistematici:

Primo, gli elementi lessicali (le parole individuali) ricevono interpretazioni di base specificate nel lessico mentale del parlante. "Gatto" denota l'insieme di tutte le entità che sono gatti nel mondo o situazione di riferimento. Formalmente, possiamo rappresentare questo come $[[\text{gatto}]] = \{x : \text{Gatto}(x)\}$, dove $[[\dots]]$ rappresenta la denotazione o significato, x è una variabile che varia su entità, e $\text{Gatto}(x)$ è un predicato che è vero se e solo se x è un gatto.

"Dorme" denota la proprietà di dormire, formalmente rappresentabile come l'insieme di tutte le entità che stanno dormendo: $[[\text{dorme}]] = \{x : \text{Dorme}(x)\}$. In una semantica di tipo Montague, questo sarebbe rappresentato più precisamente come una funzione da entità a valori di verità: $[[\text{dorme}]] = \lambda x. \text{Dorme}(x)$, dove λ è il simbolo che introduce una funzione (anche se nell'espansione che abbiamo fatto abbiamo deciso di non approfondire il lambda calculus, ne menzioniamo la notazione per completezza).

"Il" è un determinante definito che, nella semantica standard, è un operatore che prende un insieme (denotato dal nome con cui si combina) e restituisce l'unica entità saliente che appartiene a quell'insieme. La formalizzazione precisa del determinante definito è stata oggetto di dibattito filosofico esteso. La teoria di Bertrand Russell tratta "il" come coinvolgente asserzioni di esistenza e unicità: "il X " presuppone che esiste esattamente un X saliente. Teorie più recenti, come quelle di Stephen Neale e di Keith Donnellan, hanno proposto analisi più sfumate che distinguono usi referenziali (dove il parlante ha in mente una specifica entità) da usi attributivi (dove il parlante si riferisce a chiunque o qualunque cosa soddisfi la descrizione).

Secondo, queste interpretazioni lessicali si combinano secondo regole compositive che riflettono la struttura sintattica della frase. Il determinante "il" si combina prima con il nome "gatto" per formare il sintagma nominale "il gatto". Questa combinazione è governata dalla regola di modificazione determinante-nome, che in termini formali può essere espressa come: se $[[\text{Det}]]$ è la denotazione di un determinante e $[[\text{N}]]$ è la denotazione di un nome (un insieme), allora $[[\text{Det N}]] = [\underline{\text{Det}}]$, cioè applichiamo la funzione denotata dal determinante all'insieme denotato dal nome.

Nel nostro caso: $[[\text{il gatto}]] = [\underline{\text{il}}] =$ l'unico elemento saliente dell'insieme $\{x : \text{Gatto}(x)\}$. Chiamiamo questa entità particolare g .

Terzo, il sintagma nominale soggetto si combina con il predicato verbale secondo la regola di combinazione soggetto-predicato. In termini formali: se $[[\text{NP}]]$ denota un'entità e e $[[\text{VP}]]$ denota un insieme (o funzione) S , allora $[[\text{NP VP}]]$ è vero se e solo se $e \in S$ (l'entità appartiene all'insieme).

Nel nostro caso: $[[\text{il gatto dorme}]]$ è vero se e solo se $g \in \{x : \text{Dorme}(x)\}$, cioè se e solo se quel particolare gatto saliente è tra le entità che stanno dormendo. In notazione predicativa più semplice: $\text{Dorme}(g)$.

Questo processo relativamente trasparente si complica rapidamente e mostra la sua natura ricorsiva quando consideriamo frasi con strutture annidate. Consideriamo "Il gatto che il cane inseguì dorme". Qui dobbiamo interpretare una proposizione relativa annidata

all'interno del soggetto della clausola principale, e la sua interpretazione deve essere integrata composizionalmente con l'interpretazione del nome che modifica.

2.1.2 Regole di Interpretazione Ricorsiva

Le regole di interpretazione semantica devono essere esse stesse ricorsive per gestire strutture sintattiche ricorsive. Una regola formale tipica per l'interpretazione delle proposizioni relative potrebbe essere formulata come segue:

Se α è un nome che denota un insieme A , e β è una proposizione relativa della forma "che S " dove S è una frase completa contenente una traccia o variabile x legata dal pronome relativo, allora il sintagma nominale complesso formato da α modificato da β denota l'intersezione di A con l'insieme delle entità x tali che la frase S è vera quando viene interpretata con x come valore della traccia o della variabile legata dal pronome relativo.

Formalmente: $[[N \text{ RC}]] = [[N]] \cap \{x : [[S]]^{x/\text{trace}}\}$, dove $[[S]]^{x/\text{trace}}$ significa "l'interpretazione di S con x assegnato alla traccia".

Questa regola è intrinsecamente ricorsiva perché l'interpretazione di β richiede l'interpretazione di S , che è essa stessa una frase completa che può contenere sintagmi nominali complessi con proposizioni relative, che a loro volta richiedono l'applicazione della stessa regola di interpretazione. Non c'è limite in linea di principio al numero di volte che questa regola può applicarsi ricorsivamente.

Per "Il gatto che il cane inseguì dorme", applichiamo questa regola composizionale ricorsiva come segue, passo per passo:

Passo 1: Identifichiamo la struttura sintattica. La frase ha la forma $[S [NP \text{ Il } [N' \text{ gatto } [RC \text{ che } [S \text{ il cane inseguì trace}]]]] \text{ dorme}]$. Qui "trace" rappresenta una posizione vuota che è co-referente con "gatto".

Passo 2: Interpretiamo gli elementi lessicali di base:

$[[\text{gatto}]] = \{x : \text{Gatto}(x)\}$ (l'insieme di tutti i gatti)

$[[\text{cane}]] = \{x : \text{Cane}(x)\}$ (l'insieme di tutti i cani)

$[[\text{inseguì}]] = \{ \langle x, y \rangle : \text{Inseguì}(x, y) \}$ (l'insieme di tutte le coppie ordinate $\langle x, y \rangle$ tali che x inseguì y)

$[[\text{dorme}]] = \{x : \text{Dorme}(x)\}$ (l'insieme di tutte le entità che stanno dormendo)

Passo 3: Interpretiamo "il cane":

$[[\text{il cane}]] = \text{l'unico cane saliente nel contesto} = c$ (chiamiamo questa entità c)

Passo 4: Interpretiamo la proposizione relativa. La frase embedded "il cane inseguì trace" ha la struttura $[[\text{il cane}]] [\text{inseguì trace}]$. Per interpretarla, dobbiamo calcolare $[[\text{il cane inseguì trace}]]^{x/\text{trace}}$, cioè l'interpretazione con x assegnato alla posizione della traccia.

"Inseguì" è un verbo transitivo che richiede due argomenti: un soggetto (agente) e un oggetto (tema). La traccia nella proposizione relativa corrisponde all'oggetto. Quindi $[[\text{il cane inseguì trace}]]^{\{x/\text{trace}\}}$ è vero se e solo se $\langle c, x \rangle \in [[\text{inseguì}]]$, cioè se e solo se $\text{Inseguì}(c, x)$ -- il cane c inseguì l'entità x .

Passo 5: Applichiamo la regola per proposizioni relative:

$$[[\text{gatto che il cane inseguì}]] = [[\text{gatto}]] \cap \{x : [[\text{il cane inseguì trace}]]^{\{x/\text{trace}\}}\}$$

$$= \{x : \text{Gatto}(x)\} \cap \{x : \text{Inseguì}(c, x)\}$$

$$= \{x : \text{Gatto}(x) \wedge \text{Inseguì}(c, x)\}$$

Questo è l'insieme di tutte le entità x tali che x è un gatto E il cane c inseguì x . In parole semplici: gatti che furono inseguiti dal cane.

Passo 6: Applichiamo il determinante definito:

$$[[\text{il gatto che il cane inseguì}]] = \text{l'unico elemento saliente di } \{x : \text{Gatto}(x) \wedge \text{Inseguì}(c, x)\}$$

Chiamiamo questa entità particolare g . È quel particolare gatto che fu inseguito dal cane.

Passo 7: Interpretiamo la frase completa:

$[[\text{il gatto che il cane inseguì dorme}]]$ è vero se e solo se $g \in \{x : \text{Dorme}(x)\}$, cioè se e solo se $\text{Dorme}(g)$.

In termini più intuitivi: la frase è vera se e solo se quel particolare gatto che fu inseguito dal cane sta dormendo.

Questo processo di interpretazione ricorsiva può essere iterato a profondità arbitraria per frasi con multiple proposizioni relative annidate. Consideriamo "Il gatto che il cane che il bambino vide inseguì dorme":

Qui abbiamo due livelli di proposizioni relative annidate:

- Livello esterno: "che il cane che il bambino vide inseguì" modifica "gatto"
- Livello interno: "che il bambino vide" modifica "cane"

Per interpretare questa frase, dobbiamo applicare la regola per proposizioni relative due volte, in modo ricorsivo:

Primo, interpretiamo la proposizione relativa interna "che il bambino vide":

$$[[\text{cane che il bambino vide}]] = \{x : \text{Cane}(x) \wedge \text{Vide}(b, x)\}, \text{ dove } b \text{ è il bambino saliente.}$$

$$[[\text{il cane che il bambino vide}]] = \text{l'unico cane che il bambino } b \text{ vide} = c'.$$

Secondo, usiamo questa interpretazione per interpretare la proposizione relativa esterna:

$[[\text{gatto che il cane che il bambino vide inseguì}]] = \{x : \text{Gatto}(x) \wedge \text{Inseguì}(c', x)\}$

$[[\text{il gatto che il cane che il bambino vide inseguì}]] = \text{l'unico gatto che fu inseguito da } c' = g'.$

Terzo, interpretiamo la frase completa:

$[[\text{il gatto che il cane che il bambino vide inseguì dorme}]]$ è vero se e solo se $\text{Dorme}(g')$.

La natura ricorsiva di questo processo è evidente: per interpretare la proposizione relativa esterna, dobbiamo prima interpretare la proposizione relativa interna che contiene, applicando la stessa regola compositiva a un livello inferiore di annidamento. Questo è esattamente parallelo alla ricorsione sintattica: la struttura semantica è annidata della stessa maniera in cui la struttura sintattica è annidata.

2.1.3 Ambiguità di Scope e Interpretazione Multipla

Un aspetto cruciale e affascinante della semantica ricorsiva riguarda il fenomeno dell'ambiguità di scope, dove la stessa stringa superficiale di parole può ricevere interpretazioni semantiche multiple distinte a seconda di come gli operatori logici contenuti nella frase prendono scope l'uno rispetto all'altro. Questo fenomeno è particolarmente prominente con quantificatori, ma appare anche con negazione, operatori modali, operatori temporali, e altri operatori che devono essere interpretati rispetto a un dominio o contesto specifico.

Consideriamo la frase classicamente ambigua "Ogni studente lesse un libro". A prima vista, questa sembra una frase semplice e non ambigua. Tuttavia, un'analisi semantica attenta rivela che può essere interpretata in almeno due modi distinti:

Interpretazione 1 (lettura de dicto o scope largo del quantificatore esistenziale): Esiste un particolare libro x tale che ogni studente lesse x . In questa interpretazione, c'è un singolo libro specifico -- per esempio, "La Divina Commedia" -- e tutti gli studenti lessero quello stesso libro. Formalmente:

$$\exists x (\text{Libro}(x) \wedge \forall y (\text{Studente}(y) \rightarrow \text{Lesse}(y,x)))$$

Leggiamo questo come: "C'è un x tale che x è un libro, e per ogni y , se y è uno studente, allora y lesse x ."

Interpretazione 2 (lettura de re o scope largo del quantificatore universale): Per ogni studente x , esiste un libro y tale che x lesse y . In questa interpretazione, ogni studente lesse qualche libro, ma non necessariamente lo stesso libro -- Giovanni potrebbe aver letto "L'Odissea", Maria potrebbe aver letto "Moby Dick", Luca potrebbe aver letto "1984", e così via. Formalmente:

$$\forall x (\text{Studente}(x) \rightarrow \exists y (\text{Libro}(y) \wedge \text{Lesse}(x,y)))$$

Leggiamo questo come: "Per ogni x , se x è uno studente, allora esiste un y tale che y è un libro e x lesse y ."

Queste due interpretazioni corrispondono a differenti strutture semantiche ricorsive che riflettono differenti ordini di scope dei quantificatori. Nella prima interpretazione, il quantificatore esistenziale ("un libro") prende scope largo, il che significa che la sua interpretazione viene computata prima e il suo scope include il quantificatore universale ("ogni studente"). Nella seconda interpretazione, l'ordine di scope è invertito: il quantificatore universale prende scope largo e il suo scope include il quantificatore esistenziale.

La differenza tra queste interpretazioni può essere visualizzata pensando a situazioni concrete dove una è vera e l'altra falsa. Supponiamo che ci siano tre studenti: Giovanni, Maria, e Luca. Giovanni lesse "Odissea", Maria lesse "Divina Commedia", e Luca lesse "Divina Commedia". In questa situazione:

L'Interpretazione 1 ($\exists x \forall y$) è falsa, perché non c'è un singolo libro che tutti e tre gli studenti lessero.

L'Interpretazione 2 ($\forall x \exists y$) è vera, perché è vero che ogni studente lesse qualche libro (anche se non lo stesso).

Questo dimostra che le due interpretazioni hanno condizioni di verità diverse -- possono essere vere in situazioni diverse -- il che conferma che sono interpretazioni semanticamente distinte.

La ricorsione entra in questo fenomeno attraverso la struttura annidata di scope. Nella prima formula, $\exists x (\text{Libro}(x) \wedge \forall y (\text{Studente}(y) \rightarrow \text{Lesse}(y,x)))$, il quantificatore esistenziale esterno ha nel suo scope l'intera formula che segue, che include il quantificatore universale. A sua volta, il quantificatore universale ha nel suo scope la formula condizionale ($\text{Studente}(y) \rightarrow \text{Lesse}(y,x)$). Questa struttura annidata di scope riflette una gerarchia ricorsiva: scope dentro scope dentro scope.

Quando aggiungiamo un terzo quantificatore, la situazione diventa esponenzialmente più complessa e le possibilità ricorsive si moltiplicano. Consideriamo "Ogni professore ha assegnato qualche libro a ogni studente". Questa frase contiene tre quantificatori:

- "Ogni professore" (quantificatore universale $\forall x$)
- "Qualche libro" (quantificatore esistenziale $\exists y$)
- "Ogni studente" (quantificatore universale $\forall z$)

In linea di principio, questi tre quantificatori possono prendere scope relativo in sei ordini diversi ($3 \text{ factorial} = 6$), ciascuno producendo un significato distinto con diverse condizioni di verità:

1. $\forall x \forall z \exists y$: Per ogni professore x e ogni studente z , esiste un libro y che x ha assegnato a z . (Ogni coppia professore-studente potrebbe avere un libro diverso -- massima variabilità)

2. $\forall x \exists y \forall z$: Per ogni professore x , esiste un libro y tale che x ha assegnato y a ogni studente z . (Ogni professore ha un libro che ha assegnato a tutti gli studenti, ma professori diversi potrebbero aver scelto libri diversi)

3. $\exists y \forall x \forall z$: Esiste un libro y tale che ogni professore x ha assegnato y a ogni studente z . (Tutti i professori hanno assegnato lo stesso libro a tutti gli studenti -- minima variabilità)

4. $\forall z \forall x \exists y$: Per ogni studente z e ogni professore x , esiste un libro y che x ha assegnato a z . (Equivalente a 1 data la commutatività di quantificatori universali dello stesso tipo)

5. $\forall z \exists y \forall x$: Per ogni studente z , esiste un libro y tale che ogni professore x ha assegnato y a z . (Ogni studente ha ricevuto lo stesso libro da tutti i professori, ma studenti diversi potrebbero aver ricevuto libri diversi)

6. $\exists y \forall z \forall x$: Esiste un libro y tale che per ogni studente z , ogni professore x ha assegnato y a z . (Equivalente a 3)

Non tutte queste interpretazioni sono ugualmente accessibili o plausibili nella pratica linguistica. Esistono preferenze strutturali e vincoli pragmatici che favoriscono certe gerarchie di scope rispetto ad altre. Una generalizzazione robusta è che quantificatori che appaiono sintatticamente più alti nella struttura (più esterni, come il soggetto rispetto all'oggetto) tendono a prendere scope largo. Nel nostro esempio, "ogni professore" (il soggetto) tenderebbe naturalmente a prendere scope largo rispetto a "qualche libro" e "ogni studente".

Tuttavia, questo ordine sintattico di default può essere sovrascritto da vari fattori:

Fattori intonazionali: Un forte accento prosodico su un quantificatore può forzare una lettura di scope largo per quel quantificatore, anche se appare in una posizione sintattica subordinata.

Fattori contestuali: Il contesto conversazionale e le aspettative pragmatiche possono rendere certe letture di scope più salienti. Per esempio, in un contesto dove stiamo discutendo quali libri sono stati assegnati universalmente (cioè, a tutti da tutti), l'interpretazione 3 diventerebbe più saliente.

Natura semantica dei quantificatori: Quantificatori diversi hanno propensioni diverse a prendere scope largo o stretto. Quantificatori universali come "ogni" tendono a prendere scope largo rispetto a esistenziali indefiniti come "qualche" o "un". Quantificatori specifici come "un certo libro" o "un libro particolare" hanno una forte tendenza a prendere scope largo.

La teoria della Quantifier Raising, sviluppata all'interno del framework generativista, propone che all'interpretazione semantica, i quantificatori vengano mossi (sollevati) a posizioni più alte nella struttura sintattica da dove possono prendere il loro scope appropriato. Questo movimento avviene a un livello di rappresentazione sintattica astratto chiamato Logical Form (LF), che media tra la sintassi superficiale e l'interpretazione semantica.

A LF, la frase "Ogni studente lesse un libro" con lettura dove "un libro" prende scope largo avrebbe la struttura:

[Un libro₁ [ogni studente₂ [t₂ lesse t₁]]]

Dove t₁ e t₂ sono tracce lasciate dai quantificatori mossi. Questa rappresentazione rende esplicito l'ordine di scope: "un libro" è mosso alla posizione più alta, seguito da "ogni studente", determinando l'ordine di interpretazione semantica.

2.1.4 Composizionalità e Apprendibilità

Un argomento potente a favore del principio di composizionalità viene da considerazioni sull'apprendibilità del linguaggio. Come discutono Barbara Partee e Mats Rooth, la composizionalità rende possibile l'acquisizione del significato di frasi nuove basandosi sulla conoscenza precedentemente acquisita dei significati delle parole e delle regole di combinazione.

Consideriamo il compito che affronta un bambino che apprende una lingua. Il bambino sente un numero finito di enunciazioni durante l'infanzia -- anche se molto grande, questo numero è comunque finito. Tuttavia, il bambino deve acquisire la capacità di comprendere e produrre un numero potenzialmente infinito di frasi nuove che non ha mai incontrato. Come è possibile questo?

Se ogni frase avesse un significato olistico non decomponibile che dovesse essere appreso indipendentemente, il compito sarebbe impossibile: non si può apprendere infiniti significati attraverso esposizione finita. La composizionalità risolve questo problema di apprendibilità: il bambino deve apprendere solo significati per un numero finito di parole e un insieme finito di regole composizionali. Una volta acquisiti questi, il bambino può comprendere qualsiasi nuova combinazione di queste parole, applicando ricorsivamente le regole composizionali apprese.

Per esempio, supponiamo che un bambino abbia appreso i significati di "gatto", "cane", "inseguire", "dormire", "il", "che", e le regole composizionali per combinare determinanti con nomi, nomi con proposizioni relative, e soggetti con predicati. Il bambino può ora comprendere "Il gatto dorme", "Il cane dorme", "Il gatto che il cane inseguì dorme", "Il cane che il gatto inseguì dorme", e infinite altre combinazioni, senza bisogno di esposizione specifica a ciascuna di queste frasi.

Inoltre, questo apprendimento è compositivo nel senso che apprendere il significato di una nuova parola espande immediatamente e automaticamente il repertorio espressivo in modi prevedibili. Se il bambino apprende la parola "rosso", può immediatamente comprendere "il gatto rosso", "il cane rosso dorme", "il gatto rosso che il cane inseguì dorme", eccetera, applicando le regole composizionali già conosciute alla nuova parola.

Evidenze empiriche dall'acquisizione linguistica supportano questo quadro compositivo. I bambini non apprendono frasi olisticamente ma mostrano chiari segni di analisi compositiva fin dalle fasi molto precoci. Per esempio, quando iniziano a produrre frasi con due parole (tipicamente intorno ai 18-24 mesi), mostrano immediatamente creatività combinatoria, producendo nuove combinazioni che non hanno sentito negli input, come "mamma scarpa" (indicando la scarpa della mamma) o "più latte" (richiedendo più latte). Questa creatività combinatoria precoce è difficile da spiegare senza assumere che i bambini abbiano già estratto regole composizionali dall'input linguistico.

2.2 Teoria dei Tipi Semantici e Gerarchia Ricorsiva**

La teoria dei tipi semantici, sviluppata originariamente da Richard Montague negli anni Sessanta e Settanta del Novecento, fornisce un framework formale rigoroso per caratterizzare le diverse categorie di significato che le espressioni linguistiche possono avere. Questo framework è intrinsecamente ricorsivo nella sua struttura, con tipi complessi costruiti ricorsivamente a partire da tipi di base attraverso l'applicazione ripetuta di regole di costruzione dei tipi. La teoria dei tipi non solo fornisce un modo di classificare le espressioni semantiche, ma impone anche vincoli sulla possibilità di combinazione: solo espressioni di tipi compatibili possono combinarsi semanticamente in modi ben formati.

2.2.1 Tipi di Base e Tipi Funzionali

Nella teoria dei tipi di Montague, esistono due tipi semantici primitivi o di base, dai quali tutti gli altri tipi sono costruiti:

Il tipo e (entity): Questo è il tipo delle entità individuali nel dominio del discorso. Espressioni di tipo e denotano singoli oggetti, che possono essere concreti (persone, animali, oggetti fisici, luoghi) o astratti (numeri, proposizioni, eventi). Esempi prototipici di espressioni di tipo e includono nomi propri come "Maria", "Roma", "il Monte Bianco", e descrizioni definite come "il gatto", "l'autore di Promessi Sposi", "la capitale della Francia". Tutte queste espressioni si riferiscono (o aspirano a riferirsi) a entità specifiche nel dominio.

Il tipo t (truth value): Questo è il tipo dei valori di verità, che in logica classica sono due: vero ($\top$) e falso ($\perp$). Espressioni di tipo t denotano uno di questi due valori. Le frasi complete dichiarative sono prototipicamente di tipo t, poiché il loro significato semantico è essenzialmente le loro condizioni di verità -- le circostanze sotto cui sono vere versus false. "Il gatto dorme" è di tipo t perché denota vero in situazioni dove il gatto referente sta effettivamente dormendo, e falso altrimenti.

A partire da questi due tipi primitivi, possiamo costruire ricorsivamente un'infinità di tipi complessi usando l'operatore di tipo funzionale. La regola fondamentale è:

Regola di Costruzione dei Tipi Funzionali: Se α e β sono tipi (semplici o complessi), allora $\langle \alpha, \beta \rangle$ è un tipo funzionale -- il tipo delle funzioni che prendono come input (argomento) un oggetto di tipo α e restituiscono come output (valore) un oggetto di tipo β .

Questa regola di costruzione è ricorsiva perché si applica non solo ai tipi di base e e t, ma anche a qualsiasi tipo complesso già costruito. Questo significa che possiamo avere funzioni che prendono come argomenti altre funzioni, e funzioni che restituiscono come valori altre funzioni, generando una gerarchia potenzialmente infinita di tipi funzionali sempre più astratti e complessi.

2.2.2 Esempi di Tipi Semantici Comuni e Loro Interpretazione

Esaminiamo sistematicamente come espressioni linguistiche di diversi tipi si interpretano nella teoria dei tipi, illustrando con esempi dettagliati:

Tipo $\langle e, t \rangle$ - Predicati Unari (Proprietà)

Nomi comuni come "gatto", "libro", "casa" sono di tipo $\langle e, t \rangle$. Denotano funzioni da entità a valori di verità -- in altre parole, proprietà o predicati. Il significato di "gatto" è una funzione caratteristica che, data un'entità qualsiasi come input, restituisce vero se quell'entità è un gatto, falso altrimenti.

Formalmente: $[[\text{gatto}]] = \lambda x. \text{Gatto}(x)$, dove λx rappresenta una funzione con parametro x , e Gatto è un predicato primitivo.

In termini insiemistici equivalenti: $[[\text{gatto}]]$ è la funzione caratteristica dell'insieme $\{x : \text{Gatto}(x)\}$.

Quando applichiamo questa funzione a un'entità specifica, per esempio l'entità denotata da "Fufi", otteniamo un valore di verità: $[\text{gatto}] = \text{vero}$ se Fufi è un gatto, falso altrimenti.

Verbi intransitivi come "dorme", "corre", "cade", "esiste" sono analogamente di tipo $\langle e, t \rangle$, denotando proprietà che possono essere vere o false di individui. $[[\text{dorme}]] = \lambda x. \text{Dorme}(x)$.

Tipo $\langle e, \langle e, t \rangle \rangle$ - Predicati Binari (Relazioni)

Verbi transitivi come "ama", "vede", "compra", "conosce" sono di tipo $\langle e, \langle e, t \rangle \rangle$. Sono funzioni che prendono un'entità (tipicamente corrispondente all'oggetto diretto del verbo) e restituiscono una funzione di tipo $\langle e, t \rangle$ (una proprietà che può essere applicata al soggetto).

Formalmente: $[[\text{ama}]] = \lambda y. \lambda x. \text{Ama}(x, y)$

Questa notazione può sembrare controintuitiva inizialmente, ma riflette il modo in cui il significato viene costruito composizionalmente nella sintassi. Quando "ama" si combina prima con il suo oggetto "Maria", otteniamo:

$[\text{ama}] = \lambda y. \lambda x. \text{Ama}(x, y) = \lambda x. \text{Ama}(x, \text{Maria})$

Questo è una funzione di tipo $\langle e, t \rangle$ -- la proprietà di amare Maria. Quando questa proprietà viene applicata al soggetto "Giovanni", otteniamo:

$\lambda x. \text{Ama}(x, \text{Maria}) = \text{Ama}(\text{Giovanni}, \text{Maria})$

Questo è un valore di verità (tipo t): vero se Giovanni ama Maria, falso altrimenti.

Questo trattamento compositivo permette di gestire elegantemente fenomeni come la modificazione avverbiale. Se abbiamo "ama appassionatamente", l'avverbio "appassionatamente" è di tipo $\langle \langle e, \langle e, t \rangle \rangle, \langle e, \langle e, t \rangle \rangle \rangle$ -- una funzione da relazioni a relazioni. Prende la relazione "ama" e restituisce la relazione modificata "ama appassionatamente".

Tipo $\langle \langle e, t \rangle, e \rangle$ - Determinanti

Determinanti definiti come "il", "la", e "lo" sono di tipo $\langle \langle e, t \rangle, e \rangle$. Prendono una proprietà (denotata dal nome con cui si combinano) e restituiscono un'entità -- l'unica entità saliente che ha quella proprietà.

Formalmente: $[[il]] = \lambda P. \iota x[P(x)]$, dove ι è l'operatore iota di Russell che denota "l'unico x tale che". Questa formula si legge: il determinante "il" denota una funzione che, data una proprietà P , restituisce l'unico x che soddisfa P .

Quando "il" si combina con "gatto", otteniamo:

$$[[il]] = [\lambda P. \iota x[P(x)]](\lambda y. \text{Gatto}(y)) = \iota x[\text{Gatto}(x)]$$

Questo denota l'unica entità saliente nel contesto che è un gatto.

Una complicazione importante è che "il" in italiano (come "the" in inglese) presuppone che esista un'unica entità saliente che soddisfa il predicato. Se non esiste nessuna tale entità, o se ne esistono multiple senza che una sia univocamente saliente, la frase risultante può essere giudicata infelice o priva di valore di verità piuttosto che semplicemente falsa. Questo è il fenomeno della presupposizione, che discuteremo più approfonditamente in una sezione successiva.

Tipo $\langle\langle e, t \rangle, t \rangle$ - Quantificatori Generalizzati

Quantificatori come "ogni studente", "qualche libro", "nessun gatto", "la maggior parte degli insegnanti" sono di tipo $\langle\langle e, t \rangle, t \rangle$. Sono funzioni che prendono una proprietà (tipicamente denotata dal predicato verbale) e restituiscono un valore di verità.

$$\text{Per esempio: } [[\text{ogni studente}]] = \lambda P. \forall x[\text{Studente}(x) \rightarrow P(x)]$$

Questa formula si legge: "ogni studente" denota una funzione che, data una proprietà P , restituisce vero se e solo se ogni entità che è uno studente ha la proprietà P .

Quando "ogni studente" si combina con il predicato "dorme" (di tipo $\langle e, t \rangle$), otteniamo:

$$[[\text{ogni studente dorme}]] = [\text{ogni studente}]$$

$$= [\lambda P. \forall x[\text{Studente}(x) \rightarrow P(x)]](\lambda y. \text{Dorme}(y))$$

$$= \forall x[\text{Studente}(x) \rightarrow \text{Dorme}(x)]$$

Questo è un valore di verità (tipo t): vero se e solo se ogni studente sta dormendo.

Questo trattamento dei quantificatori come tipi $\langle\langle e, t \rangle, t \rangle$ è parte della teoria dei quantificatori generalizzati sviluppata da Richard Montague e estesa da Barwise e Cooper. Una proprietà importante è che non tutti i quantificatori hanno la stessa forza logica o le stesse proprietà. Per esempio:

- Quantificatori universali crescenti: "ogni", "tutti" (sono monotoni crescenti a destra: se ogni P è Q , e Q implica R , allora ogni P è R)
- Quantificatori esistenziali crescenti: "qualche", "almeno tre" (sono monotoni crescenti a destra)

- Quantificatori decrescenti: "nessun", "pochi", "al massimo tre" (sono monotoni decrescenti)
- Quantificatori non monotoni: "esattamente tre", "un numero pari di" (non sono né crescenti né decrescenti)

Queste differenze nelle proprietà logiche dei quantificatori hanno conseguenze per i pattern di inferenza validi e per fenomeni come la polarità negativa (la distribuzione di elementi come "mai", "nessuno", "alcuno" che richiedono contesti negativi o decrescenti).

2.2.3 La Torre dei Tipi: Ricorsione Indefinita

La possibilità di costruire ricorsivamente tipi sempre più complessi applicando ripetutamente l'operatore di tipo funzionale genera quella che potremmo visualizzare come una "torre dei tipi" che sale verso l'infinito in astrattezza. Consideriamo la sequenza crescente:

Livello 0 - Tipi di Base:

- e (entità)
- t (valori di verità)

Livello 1 - Funzioni da/a Tipi di Base:

- $\langle e, t \rangle$ (proprietà di entità)
- $\langle e, e \rangle$ (funzioni da entità a entità, rare nel linguaggio naturale)
- $\langle t, t \rangle$ (operatori su proposizioni, come negazione)
- $\langle t, e \rangle$ (funzioni da verità a entità, molto rare)

Livello 2 - Funzioni che Coinvolgono Tipi di Livello 1:

- $\langle \langle e, t \rangle, t \rangle$ (proprietà di proprietà, cioè quantificatori)
- $\langle \langle e, t \rangle, \langle e, t \rangle \rangle$ (modificatori di proprietà, come aggettivi intensionali o avverbi)
- $\langle \langle e, t \rangle, e \rangle$ (funzioni da proprietà a entità, come determinanti)
- $\langle e, \langle \langle e, t \rangle, t \rangle \rangle$ (funzioni da entità a quantificatori, rare ma possibili)

Livello 3 - Funzioni che Coinvolgono Tipi di Livello 2:

- $\langle \langle \langle e, t \rangle, t \rangle, t \rangle$ (proprietà di quantificatori, cioè quantificatori di secondo ordine)

- $\langle\langle e, t \rangle, t \rangle, \langle\langle e, t \rangle, t \rangle\rangle$ (modificatori di quantificatori)
- $\langle\langle e, \langle e, t \rangle \rangle, \langle e, \langle e, t \rangle \rangle\rangle$ (modificatori di relazioni)

E così via, potenzialmente all'infinito.

Ogni livello di questa torre rappresenta una categoria semantica progressivamente più astratta. Mentre i primi livelli corrispondono a categorie linguistiche comuni e facilmente identificabili (entità, proprietà, quantificatori), i livelli superiori corrispondono a costruzioni sempre più rarefatte e sofisticate che sono meno comuni nel linguaggio ordinario ma che comunque appaiono in contesti specializzati.

Un esempio genuino di espressione di tipo $\langle\langle\langle e, t \rangle, t \rangle, t \rangle$ potrebbe essere un quantificatore di secondo ordine che opera su quantificatori di primo ordine. In linguaggio naturale, espressioni metalinguistiche come "la maggior parte dei quantificatori", "almeno tre determinanti", "ogni tipo di quantificatore" potrebbero essere analizzate come aventi questo tipo elevato.

Per esempio, consideriamo la frase (ammittendo artificialità ma grammaticale): "La maggior parte dei quantificatori in questa frase sono universali." Qui "la maggior parte dei quantificatori" opera su un dominio di quantificatori piuttosto che su un dominio di entità ordinarie, suggerendo un tipo di ordine superiore.

Nella logica formale di ordine superiore (higher-order logic), quantificatori di secondo ordine sono comuni e cruciali. Per esempio, il principio di induzione matematica può essere formulato come un quantificatore di secondo ordine:

$$\forall P [(P(0) \wedge \forall n (P(n) \rightarrow P(n+1))) \rightarrow \forall n P(n)]$$

Questo si legge: "Per ogni proprietà P, se P vale per 0, e per ogni n, se P vale per n allora P vale per n+1, allora P vale per tutti i numeri naturali n." Il quantificatore esterno $\forall P$ quantifica su proprietà (tipo $\langle e, t \rangle$) piuttosto che su entità, rendendolo un quantificatore di secondo ordine (tipo $\langle\langle\langle e, t \rangle, t \rangle, t \rangle$ nella nostra notazione tipologica).

Sebbene tali espressioni di tipo molto elevato siano rare nel linguaggio quotidiano, la loro possibilità teorica dimostra la potenza espressiva illimitata che la ricorsione nei tipi fornisce. La ricorsività della costruzione dei tipi riflette e rende possibile la ricorsività delle possibilità espressive del linguaggio. In linea di principio, non c'è limite superiore alla complessità dei tipi che possono essere costruiti, proprio come non c'è limite superiore alla complessità delle strutture sintattiche che possono essere generate.

Nella pratica, tuttavia, proprio come le strutture sintattiche con embedding molto profondo sono rare perché eccedono le capacità di processamento umano, anche le espressioni di tipo molto elevato sono rare. Esiste un trade-off tra potere espressivo teorico e usabilità pratica. La maggior parte del discorso ordinario coinvolge tipi ai primi tre o quattro livelli della torre, che sono sufficienti per esprimere la vasta maggioranza di ciò che vogliamo comunicare.

2.2.4 Applicazione Funzionale e Composizione

Le regole di interpretazione semantica nella teoria dei tipi sono basate su due operazioni fondamentali che mediano tra sintassi e semantica: applicazione funzionale e composizione funzionale. Entrambe queste operazioni sono intrinsecamente ricorsive e si applicano uniformemente a tutti i livelli della gerarchia dei tipi.

Applicazione Funzionale (Function Application - FA)

L'applicazione funzionale è la regola semantica più basica e più frequentemente usata. Stabilisce come il significato di un'espressione complessa viene derivato quando una funzione incontra il suo argomento:

Regola FA: Se α è un'espressione di tipo $\langle a, b \rangle$ che denota una funzione f , e β è un'espressione di tipo a che denota un oggetto x , allora la combinazione sintattica di α e β (tipicamente una relazione sintag-predicato, determinante-nome, o verbo-oggetto) è un'espressione di tipo b il cui significato è ottenuto applicando f a x , cioè $f(x)$.

Simbolicamente: Se $[[\alpha]]$ ha tipo $\langle a, b \rangle$ e $[[\beta]]$ ha tipo a , allora $[[\alpha \beta]] = [\alpha]$ e ha tipo b .

Questa regola si applica ricorsivamente a tutti i livelli della struttura sintattica. Ogni volta che due costituenti si combinano sintatticamente, dobbiamo applicare FA (o una delle altre regole compositive) per derivare il significato del costituente risultante. Consideriamo un esempio completo e dettagliato:

Frase: "Ogni studente ama qualche professore"

Analisi Sintattica:

[S [NP Ogni studente] [VP [V ama] [NP qualche professore]]]

Interpretazione Compositiva (bottom-up):

Passo 1: Interpretiamo gli elementi lessicali di base:

- $[[studente]] = \lambda x. \text{Studente}(x) : \text{tipo } \langle e, t \rangle$
- $[[professore]] = \lambda x. \text{Professore}(x) : \text{tipo } \langle e, t \rangle$
- $[[ama]] = \lambda y. \lambda x. \text{Ama}(x, y) : \text{tipo } \langle e, \langle e, t \rangle \rangle$
- $[[ogni]] = \lambda P. \lambda Q. \forall x [P(x) \rightarrow Q(x)] : \text{tipo } \langle \langle e, t \rangle, \langle \langle e, t \rangle, t \rangle \rangle$
- $[[qualche]] = \lambda P. \lambda Q. \exists x [P(x) \wedge Q(x)] : \text{tipo } \langle \langle e, t \rangle, \langle \langle e, t \rangle, t \rangle \rangle$

Passo 2: Combiniamo "qualche" con "professore" usando FA:

$[[qualche professore]] = [\text{qualche}]$

$$= [\lambda P. \lambda Q. \exists x[P(x) \wedge Q(x)]](\lambda y. \text{Professore}(y))$$

$$= \lambda Q. \exists x[\text{Professore}(x) \wedge Q(x)] : \text{tipo } \langle \langle e, t \rangle, t \rangle$$

Passo 3: Combiniamo "ama" con "qualche professore". Qui si presenta una complicazione tipologica significativa: "ama" ha tipo $\langle e, \langle e, t \rangle \rangle$ (una funzione che aspetta un'entità come oggetto diretto), ma "qualche professore" ha tipo $\langle \langle e, t \rangle, t \rangle$ (un quantificatore generalizzato). Per risolvere questo disallineamento di tipi, la semantica formale impiega una operazione chiamata **Quantifier Raising** (QR), che sposta il quantificatore in una posizione strutturale più elevata lasciando al suo posto originale una traccia (una variabile legata).

Dopo il Quantifier Raising, la struttura logica diventa approssimativamente:

[S [NP qualche professore]_i [S [NP ogni studente] [VP ama t_i]]]

Dove t_i è una traccia co-indicizzata con il quantificatore alzato. Questa traccia ha tipo e (è una variabile su entità), risolvendo così il mismatch di tipo.

Ora possiamo procedere con l'interpretazione compositiva:

Passo 3a: Interpretiamo "ama t_i" (dove t_i è una variabile libera x):

$$[[\text{ama } t_i]] = [\text{ama}] = \lambda y. \lambda z. \text{Ama}(z, y) = \lambda z. \text{Ama}(z, x) : \text{tipo } \langle e, t \rangle$$

Questo ci dà una proprietà: "essere un amante di x", dove x è la variabile introdotta dalla traccia.

Passo 3b: Combiniamo "ogni studente" con "ama t_i":

$$\text{Prima interpretiamo "ogni studente": } [[\text{ogni studente}]] = [\text{ogni}] = [\lambda P. \lambda Q. \forall y[P(y) \rightarrow Q(y)]](\lambda y. \text{Studente}(y)) = \lambda Q. \forall y[\text{Studente}(y) \rightarrow Q(y)] : \text{tipo } \langle \langle e, t \rangle, t \rangle$$

$$\text{Poi applichiamo questo quantificatore alla proprietà "ama t_i": } [[\text{ogni studente ama t}_i]] = [[\text{ogni studente}]]([[\text{ama t}_i]]) = [\lambda Q. \forall y[\text{Studente}(y) \rightarrow Q(y)]](\lambda z. \text{Ama}(z, x)) = \forall y[\text{Studente}(y) \rightarrow \text{Ama}(y, x)] : \text{tipo } t$$

Questo afferma che ogni studente ama x, dove x è ancora la variabile libera introdotta dalla traccia.

Passo 3c: Ora applichiamo lambda-astrazione sulla variabile x per creare una proprietà che il quantificatore "qualche professore" possa prendere come argomento:

$$\lambda x. \forall y[\text{Studente}(y) \rightarrow \text{Ama}(y, x)] : \text{tipo } \langle e, t \rangle$$

Questa è la proprietà "essere tale che ogni studente lo/la ama".

Passo 4: Finalmente applichiamo il quantificatore alzato "qualche professore" a questa proprietà:

$[[\text{qualche professore} [\text{ogni studente ama } t.]]] = [[\text{qualche professore}]](\lambda x. \forall y[\text{Studente}(y) \rightarrow \text{Ama}(y,x)]) = [\lambda P. \lambda Q. \exists z[P(z) \wedge Q(z)]](\lambda x. \text{Professore}(x))(\lambda x. \forall y[\text{Studente}(y) \rightarrow \text{Ama}(y,x)]) = \exists z[\text{Professore}(z) \wedge \forall y[\text{Studente}(y) \rightarrow \text{Ama}(y,z)]] : \text{tipo } t$

Questa formula logica afferma: "Esiste qualche z tale che z è un professore e ogni y tale che y è uno studente implica che y ama z." In linguaggio naturale: "C'è qualche professore tale che ogni studente lo ama."

Composizione Funzionale (Function Composition - FC)

Oltre all'applicazione funzionale, la composizione funzionale è un'altra operazione semantica fondamentale che permette di combinare due funzioni per produrre una nuova funzione. Questa operazione è particolarmente importante quando dobbiamo interpretare strutture dove non c'è un'applicazione diretta di funzione ad argomento, ma piuttosto una composizione di due operatori.

Regola FC: Se α denota una funzione f di tipo $\langle b, c \rangle$ e β denota una funzione g di tipo $\langle a, b \rangle$, allora la loro composizione denota una funzione h di tipo $\langle a, c \rangle$ definita da $h(x) = f(g(x))$ per ogni x di tipo a.

Simbolicamente: Se $[[\alpha]] : \langle b, c \rangle$ e $[[\beta]] : \langle a, b \rangle$, allora $[[\alpha \circ \beta]] = \lambda x. [\alpha] : \langle a, c \rangle$

Un esempio classico di composizione funzionale si trova nelle costruzioni con avverbi di modo che modificano verbi transitivi. Consideriamo "rapidamente attraversare". "Attraversare" è un verbo transitivo di tipo $\langle e, \langle e, t \rangle \rangle$ (una relazione tra due entità). "Rapidamente" è un modificatore avverbiale che opera su relazioni, con tipo $\langle \langle e, \langle e, t \rangle \rangle, \langle e, \langle e, t \rangle \rangle \rangle$.

L'interpretazione di "rapidamente attraversare" richiede composizione funzionale:

$[[\text{rapidamente attraversare}]] = [\text{rapidamente}] = [\lambda R. \lambda y. \lambda x. \text{Rapidamente}(R(x,y))](\lambda y. \lambda x. \text{Attraversare}(x,y)) = \lambda y. \lambda x. \text{Rapidamente}(\text{Attraversare}(x,y))$

Questa espressione composta ha ancora tipo $\langle e, \langle e, t \rangle \rangle$, quindi può ancora prendere argomenti come un verbo transitivo normale, ma ora incorpora la modificazione avverbiale.

La Ricorsività Illimitata delle Operazioni Composizionali

Ciò che rende queste operazioni semantiche genuinamente ricorsive è che possono applicarsi ripetutamente a qualsiasi livello di complessità strutturale. Non importa quanto profondamente annidata sia una struttura sintattica, le stesse regole di applicazione funzionale e composizione funzionale possono essere applicate ricorsivamente per derivarne il significato.

Consideriamo una frase con molteplici livelli di quantificazione annidati: "Ogni professore che supervisiona qualche studente che ha scritto ogni articolo che critica qualche teoria crede che la ricerca sia importante." Questa frase contiene quattro livelli di quantificazione annidati (ogni professore, qualche studente, ogni articolo, qualche teoria), ciascuno incorporato in una proposizione relativa o completiva. L'interpretazione semantica di questa

frase richiede l'applicazione ricorsiva delle regole di applicazione funzionale a quattro livelli distinti di annidamento strutturale.

La derivazione completa sarebbe estremamente lunga (richiederebbe molte pagine di formule logiche), ma in principio è perfettamente sistematica: partiamo dalle interpretazioni lessicali di base, applichiamo le regole composizionali (principalmente applicazione funzionale con occasionale uso di quantifier raising e lambda-astrazione) in modo bottom-up seguendo la struttura sintattica, e otteniamo alla fine una formula logica complessa che rappresenta il significato della frase intera.

Questo processo dimostra che la ricorsione semantica non è limitata in profondità teorica, proprio come la ricorsione sintattica. Tuttavia, anche qui i limiti cognitivi pratici diventano evidenti con strutture molto complesse. Anche se possiamo in linea di principio computare il significato di frasi con quattro o cinque livelli di quantificazione annidata, nella pratica i parlanti umani hanno grande difficoltà a processare e comprendere tali strutture. Questo parallelo tra limiti sintattici e limiti semantici del processamento suggerisce che entrambi derivino da vincoli più generali sulla memoria di lavoro e sulle capacità di elaborazione gerarchica.

2.3 Ambiguità di Scoping e Interpretazioni Multiple

Una delle conseguenze più interessanti e teoricamente significative della ricorsione semantica è la possibilità di ambiguità di scoping nei quantificatori. Quando una frase contiene multipli quantificatori annidati, l'ordine in cui questi quantificatori prendono scoping (cioè, l'ordine della loro valutazione semantica) può produrre interpretazioni radicalmente diverse.

Il fenomeno dell'ambiguità di scoping fornisce evidenza potente che le rappresentazioni semantiche hanno una struttura gerarchica ricorsiva che può essere distinta dalla struttura sintattica superficiale. Due frasi sintatticamente identiche possono ricevere interpretazioni semantiche diverse se i quantificatori che contengono sono ordinati diversamente nella forma logica.

2.3.1 Scoping nei Quantificatori: Un Caso Paradigmatico

Consideriamo la frase apparentemente semplice: "Ogni studente ha letto qualche libro." In italiano, come in molte altre lingue, questa frase è strutturalmente ambigua a livello semantico, anche se sintatticamente ha solo una struttura superficiale.

Interpretazione 1 (Scoping Superficie): "Ogni studente" ha scoping più ampio di "qualche libro"

$$\forall x[\text{Studente}(x) \rightarrow \exists y[\text{Libro}(y) \wedge \text{HaLetto}(x,y)]]$$

Questa formula logica afferma: "Per ogni x che è uno studente, esiste un y che è un libro tale che x ha letto y." In altre parole, ogni studente ha letto almeno un libro, ma potrebbe essere un libro diverso per ogni studente. Maria potrebbe aver letto "Guerra e Pace", Giovanni potrebbe aver letto "L'Odissea", Lucia potrebbe aver letto "Don Chisciotte", e così via.

Interpretazione 2 (Scoping Inverso): "Qualche libro" ha scoping più ampio di "ogni studente"

$$\exists y[\text{Libro}(y) \wedge \forall x[\text{Studente}(x) \rightarrow \text{HaLetto}(x,y)]]$$

Questa formula logica afferma: "Esiste un y che è un libro tale che per ogni x che è uno studente, x ha letto y." In altre parole, c'è un particolare libro specifico che ogni studente ha letto. Forse tutti gli studenti nella classe hanno letto lo stesso libro assegnato, diciamo "Il Principe" di Machiavelli.

Queste due interpretazioni sono logicamente distinte e possono essere vere in situazioni differenti. La prima interpretazione è compatibile con una situazione dove ogni studente ha letto un libro diverso; la seconda interpretazione richiede che esista un libro specifico che tutti hanno letto. È importante notare che la seconda interpretazione implica logicamente la prima (se c'è un libro che tutti hanno letto, allora certamente ogni studente ha letto almeno un libro), ma non viceversa.

La preferenza per una interpretazione rispetto all'altra dipende da vari fattori pragmatici e contestuali. Nella maggior parte dei contesti neutri, la interpretazione 1 (scoping superficie) è preferita, seguendo un principio generale secondo cui i quantificatori tendono a prendere scoping nell'ordine in cui appaiono nella frase (left-to-right in lingue SVO come l'italiano). Tuttavia, certi contesti o certe intonazioni possono favorire l'interpretazione 2.

2.3.2 Interazione tra Quantificatori e Negazione

L'ambiguità di scoping diventa ancora più complessa e teoricamente interessante quando la negazione interagisce con i quantificatori. La negazione può essere vista come un operatore logico che prende una proposizione e restituisce la sua negazione, ma la sua interazione con i quantificatori produce effetti semantici sottili.

Consideriamo la frase: "Giovanni non ha letto ogni libro." Questa frase ammette almeno due interpretazioni distinte a seconda dello scoping relativo della negazione e del quantificatore universale:

Interpretazione 1 (Negazione con scoping ampio): $\neg \forall x[\text{Libro}(x) \rightarrow \text{HaLetto}(\text{Giovanni}, x)]$

"Non è il caso che per ogni libro x, Giovanni ha letto x." Equivalentemente: "Esiste almeno un libro che Giovanni non ha letto." Questa interpretazione è logicamente equivalente a: $\exists x[\text{Libro}(x) \wedge \neg \text{HaLetto}(\text{Giovanni}, x)]$, derivata attraverso le leggi di De Morgan che governano l'interazione tra negazione e quantificazione.

Interpretazione 2 (Quantificatore con scoping ampio): $\forall x[\text{Libro}(x) \rightarrow \neg \text{HaLetto}(\text{Giovanni}, x)]$

"Per ogni libro x, non è il caso che Giovanni lo ha letto." In altre parole: "Giovanni non ha letto nessun libro." Questa è un'interpretazione molto più forte che afferma che Giovanni non ha letto alcun libro.

L'italiano tende fortemente a preferire l'interpretazione 1 in questa costruzione, dove la negazione ha scoping più ampio del quantificatore universale. Per forzare l'interpretazione 2,

l'italiano ricorre tipicamente a costruzioni lessicalmente distinte come "Giovanni non ha letto nessun libro" o "Giovanni non ha letto alcun libro", dove il quantificatore negativo "nessun/alcun" rende esplicita l'interpretazione con scoping ampio del quantificatore.

Un caso ancora più complesso emerge quando abbiamo multipli quantificatori e negazione nella stessa frase: "Non ogni professore ha assegnato qualche compito a ogni studente." Questa frase ammette molteplici interpretazioni a seconda dell'ordine di scoping tra i tre operatori: la negazione "non", il quantificatore universale "ogni professore", il quantificatore esistenziale "qualche compito", e l'altro quantificatore universale "ogni studente".

In linea di principio, ci sono $4! = 24$ possibili ordinamenti di quattro operatori, anche se non tutti producono interpretazioni semanticamente distinte o pragmaticamente plausibili. Le interpretazioni più salienti includono:

1. $\neg \forall x[\text{Professore}(x) \rightarrow \forall z[\text{Studente}(z) \rightarrow \exists y[\text{Compito}(y) \wedge \text{HaAssegnato}(x,y,z)]]]$
"Non è vero che ogni professore ha assegnato qualche compito a ogni studente."
2. $\exists x[\text{Professore}(x) \wedge \exists z[\text{Studente}(z) \wedge \neg \exists y[\text{Compito}(y) \wedge \text{HaAssegnato}(x,y,z)]]]$
"C'è qualche professore e qualche studente tale che quel professore non ha assegnato nessun compito a quello studente."
3. $\exists y[\text{Compito}(y) \wedge \neg \forall x[\text{Professore}(x) \rightarrow \forall z[\text{Studente}(z) \rightarrow \text{HaAssegnato}(x,y,z)]]]$
"C'è qualche compito specifico che non ogni professore ha assegnato a ogni studente."

Queste diverse interpretazioni hanno condizioni di verità radicalmente diverse e sarebbero vere in situazioni molto differenti. La capacità dei parlanti di navigare tra queste interpretazioni multiple, di usare indizi contestuali e prosodici per disambiguare, e di computare le forme logiche appropriate, testimonia la sofisticatezza della cognizione semantica umana e la profondità della ricorsione nelle rappresentazioni semantiche.

2.4 Intensionalità e Contesti Opachi

Un aspetto particolarmente affascinante della semantica ricorsiva emerge quando consideriamo contesti intensionali o "opachi", dove i principi standard di sostituzione di termini co-referenziali non valgono. Questi contesti forniscono evidenza che le rappresentazioni semantiche non operano semplicemente con denotazioni estensionali (riferimenti nel mondo reale), ma devono incorporare significati intensionali (modi di presentare i riferimenti).

2.4.1 Verbi di Atteggiamento Proposizionale

I verbi di atteggiamento proposizionale come "credere", "sapere", "dubitare", "sperare", "temere" creano contesti opachi che richiedono un'analisi semantica ricorsiva sofisticata. Consideriamo la frase:

"Maria crede che il pianeta del mattino sia luminoso."

Supponiamo che "il pianeta del mattino" e "il pianeta della sera" siano entrambi nomi per Venere, cioè hanno la stessa denotazione estensionale. In un contesto estensionale normale, dovremmo poter sostituire termini co-referenziali senza cambiare il valore di verità della frase. Tuttavia, da:

(1) "Maria crede che il pianeta del mattino sia luminoso."

Non possiamo validamente inferire:

(2) "Maria crede che il pianeta della sera sia luminoso."

Perché è possibile che Maria non sappia che il pianeta del mattino e il pianeta della sera sono lo stesso oggetto celeste. Maria potrebbe credere che il pianeta del mattino sia luminoso ma non credere (o addirittura credere il contrario) che il pianeta della sera sia luminoso, se non sa che sono lo stesso pianeta.

Questo fenomeno, identificato inizialmente dal filosofo Gottlob Frege e sviluppato estensivamente da filosofi come Bertrand Russell, Saul Kripke, e David Kaplan, dimostra che i complementi dei verbi di atteggiamento proposizionale non possono essere interpretati semplicemente come denotanti stati di cose nel mondo (estensioni), ma devono essere interpretati come denotanti modi di presentare o concepire quegli stati di cose (intensioni).

La semantica dei mondi possibili, sviluppata principalmente da Saul Kripke, Jaakko Hintikka, e Richard Montague negli anni Sessanta e Settanta del Novecento, fornisce un framework formale per trattare l'intensionalità. In questo framework, un'intensione è una funzione da mondi possibili (e talvolta anche da tempi o altri indici) a estensioni.

Per esempio, la proposizione "il pianeta del mattino è luminoso" denota non solo un valore di verità nel mondo attuale, ma una funzione che per ogni mondo possibile w specifica se il pianeta del mattino è luminoso in w . Similmente, il nome "il pianeta del mattino" denota una funzione che per ogni mondo possibile w restituisce l'oggetto che è il pianeta del mattino in w (che potrebbe essere un oggetto diverso in mondi possibili diversi, anche se nel mondo attuale risulta essere Venere).

L'interpretazione di "Maria crede che il pianeta del mattino sia luminoso" ora coinvolge quantificazione su mondi possibili:

[[Maria crede che il pianeta del mattino sia luminoso]] è vero nel mondo attuale w_0 se e solo se: Per ogni mondo possibile w accessibile dalle credenze di Maria in w_0 , [[il pianeta del mattino è luminoso]] è vero in w .

Dove un mondo w è "accessibile dalle credenze di Maria" se w è compatibile con tutto ciò che Maria crede in w_0 . In altre parole, w è un modo in cui il mondo potrebbe essere, per quanto ne sa Maria.

Questa analisi cattura correttamente il fenomeno dell'opacità referenziale: anche se "il pianeta del mattino" e "il pianeta della sera" si riferiscono allo stesso oggetto nel mondo attuale, possono riferirsi a oggetti diversi nei mondi alternativi compatibili con le credenze di Maria. In alcuni mondi accessibili dalle credenze di Maria, il pianeta del mattino potrebbe essere Venere e luminoso, mentre il pianeta della sera potrebbe essere un oggetto celeste

completamente diverso e non luminoso, perché Maria crede erroneamente che siano oggetti distinti.

2.4.2 Ricorsione nei Contesti Intensionali Annidati

La vera complessità della semantica intensionale emerge quando abbiamo atteggiamenti proposizionali annidati -- credenze su credenze, conoscenze su desideri, speranze su paure, e così via. Consideriamo:

"Giovanni crede che Maria sappia che Paolo dubita che Lucia spera che le piante crescano rapidamente."

Questa frase contiene quattro livelli di annidamento di verbi di atteggiamento proposizionale. La sua interpretazione formale richiede quantificazione ricorsiva su mondi possibili a quattro livelli distinti:

L'interpretazione è vera nel mondo attuale w_0 se e solo se:

- Per ogni mondo w_1 accessibile dalle credenze di Giovanni in w_0 :
 - Per ogni mondo w_2 accessibile dalla conoscenza di Maria in w_1 :
 - Per ogni mondo w_3 accessibile dai dubbi di Paolo in w_2 :
 - Per ogni mondo w_4 accessibile dalle speranze di Lucia in w_3 :
 - [[le piante crescono rapidamente]] è vero in w_4

Questa struttura semantica ricorsiva rispecchia la struttura sintattica ricorsiva della frase, ma opera al livello delle intensioni piuttosto che delle estensioni. Ogni livello di annidamento di un verbo di atteggiamento proposizionale introduce un nuovo livello di quantificazione su mondi possibili, e quindi un nuovo "strato" di possibilità che dobbiamo considerare nell'interpretazione.

La capacità dei parlanti umani di processare e comprendere tali costruzioni, sebbene con difficoltà crescente all'aumentare della profondità dell'annidamento, testimonia la potenza e la flessibilità della cognizione semantica umana. Proprio come con il center-embedding sintattico, ci sono limiti pratici su quanto profondo può essere l'annidamento di atteggiamenti proposizionali prima che diventi cognitivamente intrattabile, ma questi limiti sembrano derivare da vincoli generali sulla memoria di lavoro piuttosto che da limitazioni inerenti alla competenza semantica.

2.4.3 De Re versus De Dicto

Un'altra manifestazione importante dell'intensionalità nei contesti di credenza riguarda la distinzione tra letture de re (letteralmente "della cosa") e de dicto (letteralmente "del detto"). Questa distinzione si manifesta particolarmente in frasi dove un sintagma nominale appare nel complemento di un verbo di atteggiamento proposizionale.

Consideriamo: "Maria crede che il sindaco sia corrotto."

Questa frase ammette due letture distinte:

Lettura de dicto: Maria crede che chiunque sia il sindaco, quella persona è corrotta. In altre parole, Maria ha una credenza sulla descrizione "il sindaco" -- crede che il ruolo di sindaco sia occupato da una persona corrotta. Formalmente:

$\text{Crede}(\text{Maria}, [\lambda w. \text{Corrotto}(\text{Il-sindaco-in-}w, w)])$

Dove $\text{Il-sindaco-in-}w$ è una funzione che restituisce l'individuo che è sindaco nel mondo w .

Lettura de re: C'è una persona particolare x (che si dà il caso sia il sindaco nel mondo attuale) tale che Maria crede di x che x è corrotto. Maria potrebbe non sapere che x è il sindaco; potrebbe conoscere x con un nome diverso, ma comunque crede che quella particolare persona sia corrotta. Formalmente:

$\exists x[\text{Sindaco}(x, w_0) \wedge \text{Crede}(\text{Maria}, [\lambda w. \text{Corrotto}(x, w)])]$

La distinzione è cruciale perché le due letture hanno condizioni di verità differenti. La lettura de dicto è vera se e solo se Maria ha una credenza sulla posizione di sindaco -- crede che chiunque occupi quel ruolo sia corrotto. La lettura de re è vera se e solo se c'è una persona particolare che Maria crede sia corrotta, e quella persona si dà il caso di essere il sindaco.

Per illustrare la differenza con un esempio concreto: supponiamo che il sindaco nel mondo attuale sia Giuseppe Rossi, ma Maria lo conosce solo come "Giuseppe", un suo collega di lavoro, e non sa che è il sindaco. Maria crede che Giuseppe (cioè Giuseppe Rossi) sia corrotto perché ha visto Giuseppe accettare tangenti. In questo scenario:

- La lettura de re è vera: c'è qualcuno (Giuseppe Rossi) che è il sindaco, e Maria crede di lui che sia corrotto.
- La lettura de dicto potrebbe essere falsa: Maria potrebbe non avere alcuna credenza su chi sia il sindaco o se il sindaco sia corrotto, perché non sa che Giuseppe è il sindaco.

Inversamente, supponiamo che Maria legga sui giornali articoli che accusano genericamente "il sindaco" di corruzione, ma non sa chi sia il sindaco specificamente (non conosce il suo nome o aspetto). In questo caso:

- La lettura de dicto è vera: Maria crede che il ruolo di sindaco sia occupato da qualcuno corrotto.
- La lettura de re è problematica: non è chiaro se c'è una persona particolare di cui Maria crede che sia corrotta, dato che non sa chi sia il sindaco.

2.5 Predicati Ricorsivi e Fenomeni di Polimorfismo

Un aspetto finale della semantica ricorsiva che merita attenzione è il fenomeno dei predicati ricorsivamente definiti e del polimorfismo semantico. Certi predicati nel linguaggio naturale sembrano applicarsi in modi sistematicamente ricorsivi, estendendosi da domini di base a domini più complessi secondo pattern predicibili.

2.5.1 Predicati Collettivi e Distributivi

Consideriamo predicati come "pesante". Questo predicato si applica primariamente a oggetti individuali: "Questo libro è pesante", "Quella pietra è pesante". Tuttavia, "pesante" può anche applicarsi a collezioni o insiemi: "Questi libri sono pesanti", intendendo che la collezione nel suo insieme ha peso considerevole.

Questo uso collettivo di "pesante" mostra una forma di ricorsione semantica: il predicato che si applica a entità individuali viene esteso sistematicamente per applicarsi a insiemi di quelle entità. Formalmente, se Pesante_1 è il predicato di base di tipo $\langle e, t \rangle$ che si applica a entità individuali, possiamo definire un predicato di ordine superiore Pesante_2 di tipo $\langle \{e\}, t \rangle$ che si applica a insiemi:

$$\text{Pesante}_2(S) \leftrightarrow \text{Peso}(US) > \text{soglia}_2$$

Dove US indica l'unione fisica degli elementi di S , e soglia_2 è una soglia contestualmente determinata per ciò che conta come pesante per un insieme.

Ma la ricorsione non si ferma qui. Possiamo parlare di "questi gruppi di libri sono pesanti", applicando il predicato a un insieme di insiemi (tipo $\langle \{\{e\}\}, t \rangle$). E in linea di principio, potremmo continuare: insiemi di insiemi di insiemi, e così via, ciascuno con la propria applicazione ricorsivamente definita del predicato "pesante".

2.5.2 Coercion di Tipo e Operatori Polimorfi

Un fenomeno correlato è quello che in semantica formale viene chiamato "coercion di tipo" o "type shifting". Certi operatori sembrano essere polimorfi, capaci di operare su argomenti di tipi multipli, sistematicamente correlati.

Consideriamo il verbo "iniziare". Questo verbo può prendere diversi tipi di complementi:

(1) "Giovanni ha iniziato il libro" (NP oggetto - entità di tipo e) (2) "Giovanni ha iniziato a leggere" (VP infinitivo - evento di tipo $\langle s, t \rangle$) (3) "Giovanni ha iniziato lentamente" (AvP avverbiale - modificatore)

Nel caso (1), "iniziare" con un oggetto nominale viene interpretato attraverso un processo di coercion semantica. Dato che "iniziare" intrinsecamente richiede un argomento eventivo (qualcosa che può essere iniziato è un processo o evento), l'oggetto "il libro" deve essere reinterpretato come un evento associato a quel libro. L'interpretazione di default è "iniziare a leggere il libro" -- il libro viene coerced dal tipo e (entità) al tipo $\langle s, t \rangle$ (evento) attraverso l'inserimento di un predicato eventivo contestualmente appropriato (leggere).

Questo processo di coercion può essere visto come un'operazione ricorsiva che trasforma sistematicamente espressioni di un tipo semantico in espressioni di un altro tipo secondo regole produttive. James Pustejovsky, nella sua teoria del "Generative Lexicon", ha proposto che molti fenomeni di polisemia e flessibilità semantica nel linguaggio naturale possano essere spiegati attraverso un piccolo insieme di operazioni ricorsive di coercion di tipo.

Le operazioni principali includono:

- Sfruttamento (Exploitation): Un individuo rappresenta un suo ruolo o aspetto (es. "bere un bicchiere" = bere il contenuto del bicchiere)

- Introduzione (Introduction): Una collezione di oggetti rappresenta i suoi membri (es. "il governo ha deciso" = i membri del governo hanno deciso)
- Cocomposizione (Cocomposition): Due complementi di un verbo si influenzano mutuamente semanticamente (es. "cuocere la torta" vs "cuocere il mattone" -- stessi tipi sintattici ma eventi diversi)

Ciascuna di queste operazioni può applicarsi ricorsivamente. Per esempio, in "Giovanni ha iniziato il primo capitolo del libro", abbiamo coercion annidato: "il libro" viene coerced a un evento di lettura, e poi "il primo capitolo del libro" viene coerced a un sotto-evento che è la lettura di quel particolare capitolo.

CAPITOLO 3: IMPLEMENTAZIONI COMPUTAZIONALI E APPLICAZIONI

Il passaggio dalla teoria linguistica all'implementazione computazionale della ricorsione rappresenta uno dei ponti più significativi tra le scienze cognitive, la linguistica formale e l'informatica teorica. L'implementazione computazionale non solo fornisce test concreti per le teorie linguistiche sulla ricorsione, ma rivela anche nuove dimensioni del fenomeno che possono non essere immediatamente evidenti dall'analisi teorica. In questo capitolo esploreremo come la ricorsione sintattica e semantica è stata implementata nei sistemi di elaborazione del linguaggio naturale, le sfide tecniche che emergono da questi sforzi, e le applicazioni pratiche che ne derivano.

3.1 Architetture di Parser per Strutture Ricorsive

Il parsing sintattico -- il processo di analisi di stringhe di parole per determinare la loro struttura grammaticale -- è stato uno dei primi e più intensamente studiati problemi nell'elaborazione computazionale del linguaggio naturale. L'implementazione efficiente di parser capaci di gestire la ricorsione sintattica ha richiesto lo sviluppo di algoritmi sofisticati e strutture dati specializzate.

3.1.1 Parser Chart e Programmazione Dinamica

Uno degli approcci più eleganti e computazionalmente efficienti al parsing di grammatiche ricorsive è l'algoritmo di parsing chart, di cui l'algoritmo CYK (Cocke-Younger-Kasami) e l'algoritmo di Earley sono esemplari classici. Questi algoritmi sfruttano la programmazione dinamica per evitare il ricalcolo ridondante di sottoproblemi, una sfida particolare quando si processano strutture ricorsive che possono avere molti sottoalberi condivisi.

L'idea centrale del chart parsing è memorizzare in una struttura dati chiamata "chart" tutti i costituenti parzialmente o completamente riconosciuti durante il parsing. Quando il parser incontra la stessa sottostringa in contesti diversi, può riutilizzare il lavoro già fatto piuttosto che rianalizzare la sottostringa da zero.

L'Algoritmo CYK

L'algoritmo CYK richiede che la grammatica sia in Forma Normale di Chomsky (CNF), dove ogni regola di produzione è nella forma $A \rightarrow BC$ (due non-terminali) o $A \rightarrow a$ (un terminale).

Sebbene questa restrizione possa sembrare limitante, qualsiasi grammatica libera dal contesto può essere convertita in CNF equivalente.

L'algoritmo costruisce una tabella triangolare (il "chart") dove l'entrata $[i,j,A]$ indica se il non-terminale A può derivare la sottostringa dalla posizione i alla posizione j . La costruzione della tabella procede bottom-up, riempiendo prima le entrate per sottostringhe di lunghezza 1, poi lunghezza 2, e così via fino a sottostringhe che coprono l'intera frase.

Pseudocodice semplificato dell'algoritmo CYK:

funzione CYK_Parse(parole, grammatica):

$n = \text{lunghezza}(\text{parole})$

 Crea $\text{chart}[n+1][n+1][\text{Non_terminali}]$

 Inizializza chart con false

 # Caso base: sottostringhe di lunghezza 1 (singole parole)

 per i da 1 a n :

 per ogni regola $A \rightarrow \text{parole}[i]$:

$\text{chart}[i][i][A] = \text{true}$

 # Caso ricorsivo: sottostringhe di lunghezza 2 a n

 per lunghezza da 2 a n :

 per inizio da 1 a $(n - \text{lunghezza} + 1)$:

$\text{fine} = \text{inizio} + \text{lunghezza} - 1$

 per split da inizio a $(\text{fine} - 1)$:

 per ogni regola $A \rightarrow BC$:

 se $\text{chart}[\text{inizio}][\text{split}][B]$ e $\text{chart}[\text{split}+1][\text{fine}][C]$:

$\text{chart}[\text{inizio}][\text{fine}][A] = \text{true}$

 # La frase è grammaticale se S può derivare l'intera stringa

 ritorna $\text{chart}[1][n][S]$

La complessità temporale di CYK è $O(n^3|G|)$, dove n è la lunghezza della frase e $|G|$ è la dimensione della grammatica (numero di regole). Questo è polinomiale e quindi trattabile, un miglioramento drammatico rispetto agli approcci di backtracking naive che possono avere complessità esponenziale per grammatiche ricorsive ambigue.

L'Algoritmo di Earley

L'algoritmo di Earley, sviluppato da Jay Earley nel 1970, è più flessibile del CYK perché non richiede che la grammatica sia in forma normale e gestisce direttamente la ricorsione sinistra (che deve essere eliminata per i parser ricorsivi discendenti). Inoltre, Earley può operare in tempo $O(n^3)$ per grammatiche arbitrarie, ma raggiunge $O(n^2)$ per grammatiche non ambigue e addirittura $O(n)$ per un'importante sottoclasse di grammatiche.

L'algoritmo mantiene un chart di "stati" (items), dove ogni stato rappresenta un'ipotesi parzialmente completata su come una regola di produzione potrebbe essere usata per derivare parte della frase. Uno stato ha la forma:

$[A \rightarrow \alpha \cdot \beta, i, j]$

Questo indica che stiamo considerando la regola $A \rightarrow \alpha\beta$, abbiamo già riconosciuto α (derivandolo dalla posizione i alla posizione j), e ora cerchiamo di riconoscere β a partire dalla posizione j .

L'algoritmo opera attraverso tre operazioni principali:

- **Prediction:** Se abbiamo uno stato $[A \rightarrow \alpha \cdot B\beta, i, j]$ (stiamo cercando un B), aggiungiamo stati per tutte le regole che espandono B : $[B \rightarrow \gamma, j, j]$.
- **Scanning:** Se abbiamo $[A \rightarrow \alpha \cdot a\beta, i, j]$ e la parola alla posizione $j+1$ è effettivamente a , avanziamo: $[A \rightarrow \alpha a\beta, i, j+1]$.
- **Completion:** Se completiamo uno stato $[B \rightarrow \gamma, j, k]$ (abbiamo derivato completamente B dalle posizioni j a k), guardiamo indietro per tutti gli stati che stavano aspettando B : $[A \rightarrow \alpha \cdot B\beta, i, j]$ diventa $[A \rightarrow \alpha B\beta, i, k]$.

La ricorsione è gestita naturalmente attraverso queste operazioni: quando la Prediction incontra ricorsione (per esempio B può espandersi a una regola che include nuovamente B), crea nuovi stati che possono essere processati dalle stesse operazioni, permettendo annidamento ricorsivo arbitrario.

3.1.2 Parser Probabilistici e Statistici

L'introduzione di informazioni probabilistiche nel parsing ha rappresentato una svolta cruciale nello sviluppo di parser robusti per il linguaggio naturale. Le Probabilistic Context-Free Grammars (PCFG) assegnano probabilità a ciascuna regola di produzione, permettendo al parser non solo di determinare se una frase è grammaticale e quali strutture ha, ma anche di classificare le diverse analisi strutturali per probabilità.

In una PCFG, ogni regola di produzione $A \rightarrow \beta$ ha una probabilità $P(A \rightarrow \beta)$ tale che per ogni non-terminale A , la somma delle probabilità di tutte le regole con A sul lato sinistro è 1:

$$\sum_{\beta: A \rightarrow \beta \in P} P(A \rightarrow \beta) = 1$$

La probabilità di un albero di derivazione completo T è il prodotto delle probabilità di tutte le regole usate in quella derivazione:

$$P(T) = \prod_{\{A \rightarrow \beta \in T\}} P(A \rightarrow \beta)$$

Per frasi ambigue che hanno multipli alberi di derivazione possibili, il parser probabilistico cerca l'albero con la probabilità massima:

$$T^* = \operatorname{argmax}_{\{T \in \text{Alberi}(\text{frase})\}} P(T)$$

Questo obiettivo può essere raggiunto efficientemente attraverso una variante probabilistica dell'algoritmo CYK che, invece di semplicemente registrare se un non-terminale può derivare una sottostringa, registra la probabilità massima con cui può farlo.

Apprendimento di PCFG da Treebanks

Una delle grandi innovazioni negli anni Novanta del Novecento fu la costruzione di grandi corpus annotati sintatticamente (treebanks) come il Penn Treebank per l'inglese. Questi corpus contengono migliaia o centinaia di migliaia di frasi con le loro strutture sintattiche annotate manualmente da esperti linguisti.

Da un treebank, le probabilità delle regole di una PCFG possono essere stimate direttamente attraverso Maximum Likelihood Estimation (MLE):

$$P(A \rightarrow \beta) = \text{Count}(A \rightarrow \beta) / \text{Count}(A)$$

Dove $\text{Count}(A \rightarrow \beta)$ è il numero di volte che la regola $A \rightarrow \beta$ appare nel treebank, e $\text{Count}(A)$ è il numero totale di volte che il non-terminale A appare sul lato sinistro di qualsiasi regola.

Questo approccio basato sui dati ha permesso la costruzione di parser ad alte prestazioni che raggiungono accuratezze del 90% o superiori nell'assegnazione di strutture sintattiche corrette a frasi in inglese. Tuttavia, le PCFG semplici basate su treebank soffrono di alcuni problemi importanti:

1. **Independence Assumptions Troppo Forti:** Le PCFG assumono che la probabilità di applicare una regola dipenda solo dal non-terminale sul lato sinistro, non dal contesto più ampio nella struttura sintattica. Questo porta a preferenze errate. Per esempio, la regola $\text{NP} \rightarrow \text{pronome}$ potrebbe essere molto più probabile quando NP è soggetto che quando è oggetto, ma una PCFG pura non cattura questa dipendenza.
2. **Ambiguità di Attachment:** Le PCFG pure hanno difficoltà con decisioni di attachment preposizionale. In "Vedo l'uomo con il telescopio", "con il telescopio" modifica "vedo" o "l'uomo"? La decisione dipende da conoscenze lessicali (i telescopi sono strumenti per vedere) che le PCFG non incorporano direttamente.

Lexicalizzazione e Parser Head-Driven

Per affrontare questi problemi, sono state sviluppate PCFG lessicalizzate dove le regole includono informazioni sulla parola principale (head) di ciascun costituente. Per esempio, invece di avere semplicemente una regola $\text{VP} \rightarrow \text{V NP}$, una PCFG lessicalizzata avrebbe regole specifiche come $\text{VP}(\text{vedere}) \rightarrow \text{V}(\text{vedere}) \text{NP}(\text{telescopio})$, dove le parole specifiche influenzano le probabilità.

Il parser di Collins (1997, 1999) e il parser di Charniak (1997, 2000) sono esempi influenti di parser statistici lessicalizzati che hanno raggiunto accuratezze state-of-the-art sui benchmark standard. Questi parser mantengono la trattabilità computazionale dell'approccio PCFG base (complessità cubica) mentre incorporano molto più contesto lessicale e strutturale nelle loro decisioni.

3.1.3 Parser Neurali e Transformer

Negli ultimi quindici anni, l'ascesa dell'apprendimento profondo (deep learning) ha trasformato radicalmente il parsing sintattico. I parser neurali moderni, specialmente quelli

basati sull'architettura Transformer, hanno raggiunto livelli di performance che superano i migliori parser statistici classici, avvicinandosi o talvolta superando l'accordo inter-annotatore umano su alcuni task.

Architetture Encoder-Decoder per il Parsing

Un approccio influente è trattare il parsing come un problema di traduzione sequenza-a-sequenza, dove la sequenza di input è la frase in linguaggio naturale e la sequenza di output è una rappresentazione linearizzata dell'albero sintattico. Le architetture encoder-decoder con meccanismi di attenzione possono apprendere a mappare frasi ad alberi sintattici end-to-end, senza bisogno di features ingegnerizzate manualmente.

Per esempio, dato l'input: "Il gatto dorme"

Il modello potrebbe produrre la rappresentazione linearizzata: "(S (NP (Det Il) (N gatto)) (VP (V dorme)))"

Il training di questi modelli richiede grandi quantità di dati annotati (treebanks), ma una volta addestrati possono generalizzare sorprendentemente bene a strutture sintattiche che non hanno visto durante il training, incluse strutture ricorsive profondamente annidate.

Attenzione Multi-Testa e Rappresentazione di Dipendenze Gerarchiche

Il meccanismo di attenzione multi-testa nei Transformer si è dimostrato particolarmente efficace per catturare relazioni gerarchiche nelle strutture sintattiche. Studi recenti hanno mostrato che diversi "heads" di attenzione in modelli come BERT apprendono spontaneamente a focalizzarsi su relazioni sintattiche specifiche come dipendenze soggetto-verbo, modificazione aggettivo-nome, e annidamento di clausole.

Particolarmente rilevante per la ricorsione, alcune teste di attenzione sembrano specializzarsi nel tracciare relazioni di annidamento a lunga distanza. Per esempio, in una frase con proposizioni relative annidate, certe teste di attenzione mostrano pattern di attenzione che connettono accuratamente verbi alle loro proposizioni relative di origine, anche attraverso multipli livelli di annidamento.

Limiti e Sfide dei Parser Neurali

Nonostante i loro successi impressionanti, i parser neurali mostrano debolezze interessanti che possono illuminare la natura della ricorsione sintattica:

1. **Degradazione su Strutture Profondamente Annidate:** Mentre i parser neurali performano eccellentemente su strutture con 1-2 livelli di annidamento (che costituiscono la vasta maggioranza dei dati di training), la loro accuratezza degrada significativamente su frasi con 4+ livelli di center-embedding, strutture che sono rare nei dati di training.
2. **Difficoltà con Dipendenze a Distanza Arbitraria:** Sebbene i Transformer possano in teoria gestire dipendenze a qualsiasi distanza grazie all'attenzione globale, in pratica mostrano bias verso dipendenze locali e possono fare errori su dipendenze che si estendono su lunghe distanze, specialmente quando intervengono materiali

distrattori.

3. **Sensibilità all'Ordine dei Costituenti:** I modelli neurali sono altamente sensibili all'ordine superficiale delle parole e possono essere "ingannati" da frasi che mantengono l'ordine corretto delle parole ma violano vincoli strutturali profondi in modi che un parser simbolico probabilmente catturerebbe.

Queste limitazioni suggeriscono che, sebbene i modelli neurali apprendano approssimazioni utili della sintassi ricorsiva dai dati, potrebbero non catturare pienamente la natura algebrica e compositiva della ricorsione sintattica nel modo in cui i formalismi grammaticali simbolici lo fanno.

3.2 Sistemi di Generazione di Linguaggio Naturale

Se il parsing è il processo di andare dalla superficie linguistica alla struttura sintattica, la generazione di linguaggio naturale (Natural Language Generation - NLG) è il processo inverso: partire da una rappresentazione semantica o da conoscenza strutturata e produrre una frase ben formata che esprima quella conoscenza. L'implementazione della ricorsione nei sistemi di generazione presenta sfide e opportunità distinte.

3.2.1 Generazione Template-Based e Ricorsione Limitata

Gli approcci più semplici alla NLG utilizzano templates (modelli) predefiniti con slot che vengono riempiti con informazioni specifiche. Per esempio:

Template: "Il [PERSONA] ha [VERBO] il [OGGETTO]" Input: PERSONA=gatto, VERBO=visto, OGGETTO=topo Output: "Il gatto ha visto il topo"

Questi sistemi possono incorporare ricorsione limitata permettendo che certi slot contengano essi stessi istanze di template. Per esempio:

Template_Principale: "Il [EVENTO1] è accaduto prima che [EVENTO2]" Template_Evento: "[PERSONA] [VERBO] [OGGETTO]"

Con annidamento ricorsivo: EVENTO1 = "il gatto vide il topo" EVENTO2 = "il cane inseguì il gatto" Output: "Il gatto vide il topo è accaduto prima che il cane inseguì il gatto"

Tuttavia, la ricorsione in sistemi template-based è tipicamente limitata a piccole profondità predefinite, perché ogni livello di annidamento deve essere previsto esplicitamente dal designer del sistema. Non c'è un meccanismo genuinamente ricorsivo che permetta annidamento illimitato.

3.2.2 Generazione Basata su Grammatica e Realizzazione Superficiale

Approcci più sofisticati alla NLG utilizzano grammatiche formali esplicite (spesso le stesse grammatiche usate per il parsing) per generare frasi da rappresentazioni semantiche o logiche. Questo processo tipicamente coinvolge diverse fasi:

Fase 1: Content Determination - Decidere quale informazione includere

Fase 2: Document Structuring - Organizzare l'informazione in una struttura retorica

Fase 3: Lexicalization - Scegliere le parole appropriate per esprimere i concetti

Fase 4: Referring Expression Generation - Generare espressioni referenziali appropriate ("il gatto" vs "esso" vs "l'animale")

Fase 5: Surface Realization - Applicare regole grammaticali per produrre la stringa superficiale finale

La fase di surface realization è dove la ricorsione sintattica è più esplicitamente implementata. Il realizzatore prende una struttura semantica gerarchica e applica regole grammaticali ricorsivamente per produrre una struttura sintattica, che viene poi linearizzata in una stringa di parole.

Per esempio, supponiamo di avere la rappresentazione semantica:

CREDERE(Maria, ANDARE(Giovanni, Mercato))

Questa rappresentazione annidata richiede generazione ricorsiva:

1. Prima, realizziamo la clausola interna ANDARE(Giovanni, Mercato):
 - ANDARE → "andare"
 - Giovanni → "Giovanni"
 - Mercato → "mercato" (con articolo → "al mercato")
 - Combiniamo: "Giovanni andare al mercato"
 - Appliciamo morfologia verbale in clausola subordinata: "Giovanni vada al mercato" (congiuntivo)
2. Poi, realizziamo la clausola esterna CREDERE(Maria, ...):
 - CREDERE → "credere"
 - Maria → "Maria"
 - La clausola subordinata già realizzata viene incorporata con congiunzione subordinante "che"
 - Combiniamo: "Maria credere che Giovanni vada al mercato"
 - Appliciamo morfologia verbale: "Maria crede che Giovanni vada al mercato"

Questo esempio semplificato illustra come la realizzazione superficiale deve operare ricorsivamente, processando prima le strutture più interne (embedded) prima di integrarle nelle strutture esterne.

Sistemi di Realizzazione Basati su Unificazione

Sistemi di realizzazione sofisticati come FUF/SURGE, Penman/KPML, e più recentemente SimpleNLG, utilizzano formalismi di unificazione per combinare informazione lessicale, sintattica, e semantica in modo altamente compositivo. Questi sistemi mantengono strutture di features (feature structures) che rappresentano tutti gli aspetti rilevanti di un

costituente sintattico -- la sua categoria, accordo morfologico, funzioni grammaticali, relazioni semantiche, e così via.

La ricorsione è implementata naturalmente in questi sistemi: una feature structure per una clausola può contenere features per i suoi costituenti (soggetto, predicato, complementi), ciascuno dei quali è esso stesso una feature structure che può contenere sotto-costituenti, e così via ricorsivamente.

Per esempio, la feature structure per "Maria crede che Giovanni vada al mercato" potrebbe essere schematicamente:

```
[CAT: S
  TENSE: presente
  SOGGETTO: [CAT: NP, TESTA: "Maria", NUMERO: sg, PERSONA: 3]
  PREDICATO: [CAT: VP
    TESTA: "credere"
    COMPLEMENTO: [CAT: S-COMP
      CONGIUNZIONE: "che"
      MODO: congiuntivo
      SOGGETTO: [CAT: NP, TESTA: "Giovanni"]
      PREDICATO: [CAT: VP
        TESTA: "andare"
        COMPLEMENTO: [CAT: PP
          PREP: "a"
          OGGETTO: [CAT: NP
            ARTICOLO: "il"
            TESTA: "mercato"]]]]]]]]
```

Il processo di realizzazione attraversa questa struttura ricorsivamente, linearizzando ciascun costituente secondo le regole di ordine delle parole della lingua target, applicando morfologia appropriata (accordo, coniugazione verbale), e inserendo elementi funzionali (articoli, preposizioni, congiunzioni).

3.2.3 Generazione Neurale e Modelli Transformer

L'avvento dei modelli linguistici neurali, specialmente i modelli basati su Transformer come GPT (Generative Pre-trained Transformer), ha rivoluzionato la generazione di linguaggio naturale. Questi modelli, addestrati su enormi quantità di testo, possono generare prose fluente e coerente che spesso è indistinguibile dal testo scritto da umani.

Architettura dei Modelli Generativi Transformer

I modelli come GPT utilizzano un'architettura decoder-only Transformer con attention causale (masked self-attention), che permette al modello di attendere solo ai token precedenti nella sequenza quando genera il token successivo. Questa architettura è intrinsecamente autoregressiva: genera un token alla volta, condizionato su tutti i token generati precedentemente.

La capacità di questi modelli di produrre strutture ricorsive emerge implicitamente dall'apprendimento su dati testuali che contengono tali strutture. Il modello apprende pattern statistici che riflettono la ricorsione sintattica, anche se non ha rappresentazioni simboliche esplicite di regole grammaticali ricorsive.

Prova della Capacità Ricorsiva in Modelli Neurali

Esperimenti controllati hanno testato la capacità di modelli linguistici neurali di generare e comprendere strutture ricorsive. Alcuni risultati chiave:

1. **Strutture Relativamente Shallow:** Modelli come GPT-3 e GPT-4 dimostrano ottima competenza nella generazione di strutture con 1-2 livelli di annidamento sintattico, che sono comuni nel testo naturale.
2. **Degradazione su Annidamento Profondo:** La qualità grammaticale degrada significativamente quando si richiedono strutture con 3+ livelli di center-embedding. I modelli possono "perdere traccia" della struttura ricorsiva, omettendo elementi richiesti o producendo sequenze agrammaticali.
3. **Sensibilità alla Frequenza nel Training Data:** Le strutture ricorsive rare nei dati di addestramento (come certe forme di subordinazione complessa) sono gestite meno bene anche quando sono perfettamente grammaticali.
4. **Successo su Ricorsione Tail (Right-Branching):** I modelli mostrano molta più competenza su strutture ricorsive right-branching, riflettendo sia la loro maggiore frequenza nei dati sia la loro minore complessità computazionale.

Prompting per Strutture Ricorsive

Tecniche moderne di prompting possono elicitar strutture ricorsive più complesse dai modelli linguistici. Per esempio:

Prompt: "Genera una frase con almeno tre livelli di proposizioni relative annidate."

GPT-4 potrebbe produrre: "Il professore che ha scritto il libro che ha vinto il premio che la giuria ha assegnato è famoso."

Tuttavia, analisi attente rivelano che queste strutture, sebbene grammaticalmente corrette, spesso non raggiungono la profondità richiesta o contengono errori sottili di accordo o binding quando l'annidamento diventa veramente profondo.

3.3 Traduzione Automatica e Preservazione della Ricorsione

La traduzione automatica (Machine Translation - MT) rappresenta uno dei task più sfidanti nell'elaborazione del linguaggio naturale, richiedendo non solo comprensione profonda della lingua sorgente ma anche abilità di generazione sofisticata nella lingua target. La ricorsione sintattica pone sfide particolari per i sistemi di traduzione automatica.

3.3.1 Approcci Basati su Regole e Transfer Sintattico

I primi sistemi di traduzione automatica, specialmente quelli basati su approcci di "transfer sintattico", tentavano di preservare esplicitamente la struttura ricorsiva durante la traduzione. Il processo tipicamente coinvolgeva tre fasi:

Fase 1: Analisi - Parsing della frase sorgente per produrre una rappresentazione sintattica gerarchica

Fase 2: Transfer - Trasformazione della struttura sintattica della lingua sorgente nella struttura appropriata per la lingua target, applicando regole di transfer che mappano costruzioni sintattiche da una lingua all'altra

Fase 3: Generazione - Realizzazione superficiale della struttura target in una stringa di parole nella lingua target

La ricorsione deve essere preservata attraverso tutte queste fasi. Per esempio, consideriamo la traduzione dall'italiano all'inglese di:

"Il libro che lo studente che ammiro ha scritto è eccellente."

Fase 1 (Analisi italiano):

[S [NP Il libro [RC che [S [NP lo studente [RC che ammiro]] ha scritto]]] è eccellente]

Fase 2 (Transfer): La struttura deve essere mappata alla sintassi inglese, gestendo differenze come:

- Ordine degli ausiliari (italiano "ha scritto" → inglese "has written")
- Gestione dei pronomi oggetto (italiano "che ammiro" → inglese "whom I admire" o "that I admire")
- Posizione del pronome relativo e agreement

Fase 3 (Generazione inglese): "The book that the student whom I admire has written is excellent."

Oppure, con pronome relativo ridotto: "The book that the student I admire has written is excellent."

Questo approccio preserva esplicitamente la struttura ricorsiva, ma richiede grammatiche dettagliate e regole di transfer per ogni coppia di lingue, rendendolo costoso da sviluppare e mantenere.

3.3.2 Traduzione Automatica Statistica (Statistical MT)

L'approccio della traduzione automatica statistica (SMT), dominante negli anni 2000-primi 2010, trattava la traduzione come un problema di massimizzazione di probabilità. Dato una frase sorgente f , cercare la frase target e che massimizza $P(e|f)$.

Usando il teorema di Bayes: $P(e|f) \propto P(f|e) \times P(e)$

Dove $P(f|e)$ è il "translation model" (appreso da corpus paralleli) e $P(e)$ è il "language model" (appreso da corpus monolingui nella lingua target).

Phrase-Based SMT e Limiti sulla Ricorsione

I sistemi SMT phrase-based, come il popolare sistema Moses, traducevano sequenze di parole ("phrases") come unità, senza costruire rappresentazioni sintattiche esplicite. Questi sistemi avevano difficoltà significative con strutture ricorsive profonde perché:

1. Le "phrases" erano tipicamente limitate a sequenze contigue di al massimo 7-10 parole
2. Non c'era rappresentazione esplicita di dipendenze gerarchiche a lunga distanza
3. Il riordino delle parole era limitato a finestre locali (tipicamente ± 6 parole)

Per frasi con subordinazione complessa o annidamento profondo, i sistemi phrase-based producevano spesso traduzioni con:

- Struttura sintattica scrambled o incoerente
- Perdita di informazione dalle clausole più profondamente annidate
- Errori di agreement quando soggetti e verbi erano separati da materiale annidato

Hierarchical Phrase-Based SMT

Per affrontare questi limiti, David Chiang sviluppò il modello "Hierarchical Phrase-Based SMT" (2005), che incorpora una forma limitata di ricorsione. Il sistema apprende regole di tipo context-free che possono contenere non solo parole ma anche "variabili" che rappresentano sotto-frasi:

Esempio di regola gerarchica: $X \rightarrow \text{"il } X_1 \text{ che } X_2" \mid \text{"the } X_2 \text{ that } X_1"$

Questa regola codifica che una frase nominale italiana con proposizione relativa ("il [qualcosa] che [qualcosa]") si traduce in inglese riordinando i costituenti. Le variabili X_1 e X_2 possono essere espanse ricorsivamente usando altre regole, permettendo annidamento arbitrario.

Questo approccio migliorò significativamente la traduzione di strutture complesse, ma aveva ancora limitazioni:

- Le regole erano apprese automaticamente dai dati e potevano essere rumorose
- La ricorsione era implicita piuttosto che esplicita
- Nessuna garanzia di coerenza grammaticale globale

3.3.3 Neural Machine Translation e Ricorsione Implicita

L'avvento della Neural Machine Translation (NMT), specialmente con architetture sequence-to-sequence basate su attention e poi Transformer, ha portato a miglioramenti drammatici nella qualità della traduzione. I modelli NMT moderni gestiscono strutture ricorsive implicitamente attraverso i loro meccanismi di encoding e decoding neurali.

Architettura Transformer per NMT

L'architettura Transformer standard per NMT consiste di:

- Un **encoder** che processa l'intera frase sorgente e produce rappresentazioni contestuali per ogni token
- Un **decoder** che genera la traduzione token-per-token, usando attention cross-linguale per "guardare" alle rappresentazioni dell'encoder

Il meccanismo di self-attention multi-head nell'encoder permette al modello di catturare dipendenze a lunga distanza e relazioni gerarchiche nella frase sorgente, incluse quelle create da annidamento ricorsivo.

Gestione della Ricorsione in NMT

Studi su come i modelli NMT gestiscono la ricorsione hanno rivelato:

1. **Apprendimento Implicito di Struttura:** Le rappresentazioni interne dei Transformer codificano implicitamente informazione sintattica, incluse relazioni di constituency e dependency che riflettono la struttura ricorsiva.
2. **Heads di Attention Specializzati:** Alcune attention heads apprendono a tracciare specifici tipi di dipendenze sintattiche, incluse quelle attraverso boundaries di clausole annidate.
3. **Successo su Strutture Comuni:** Per strutture ricorsive che sono ben rappresentate nei dati di training (come subordinate complementari con "che/that"), i modelli NMT producono traduzioni eccellenti che preservano la struttura.
4. **Degradazione su Strutture Rare:** Per strutture ricorsive rare o altamente complesse (4+ livelli di annidamento), anche modelli NMT state-of-the-art possono produrre errori, inclusi:
 - Perdita di clausole profondamente annidate
 - Errori di attachment (attaccare una clausola al verbo sbagliato)
 - Problemi con agreement a lunga distanza

Zero-Shot e Few-Shot Transfer di Strutture Ricorsive

Un fenomeno interessante è la capacità dei modelli NMT multilingue (addestrati su molte paia di lingue simultaneamente) di trasferire conoscenza su strutture ricorsive tra lingue. Un modello addestrato principalmente su coppie lingua A-lingua B può ancora tradurre ragionevolmente tra lingua A-lingua C per strutture ricorsive, anche con dati di training limitati per quella coppia, suggerendo che apprende rappresentazioni astratte di strutture sintattiche ricorsive che generalizzano attraverso le lingue.

3.4 Question Answering e Ragionamento Ricorsivo

I sistemi di question answering (QA) devono spesso processare domande che contengono annidamento ricorsivo e ragionare su conoscenze che sono organizzate gerarchicamente. Questo richiede capacità sofisticate di analisi sintattica e semantica ricorsiva.

3.4.1 Question Answering su Testo e Parsing Semantico

Consideriamo una domanda complessa come:

"Chi è l'autore del libro che ha vinto il premio che la giuria che il comitato ha nominato ha assegnato?"

Questa domanda contiene tre livelli di proposizioni relative annidate. Per rispondere correttamente, un sistema QA deve:

1. **Parsing Sintattico:** Analizzare la struttura ricorsiva della domanda per identificare la struttura gerarchica delle proposizioni relative.
2. **Costruzione della Query Semantica:** Tradurre la struttura sintattica in una rappresentazione semantica formale, per esempio in logica:

$$\begin{aligned} ?x \exists y,z,w,v [& \text{Autore}(x,y) \wedge \text{Libro}(y) \wedge \\ & \text{VintoPremio}(y,z) \wedge \text{Premio}(z) \wedge \\ & \text{HaAssegnato}(w,z) \wedge \text{Giuria}(w) \wedge \\ & \text{HaNominato}(v,w) \wedge \text{Comitato}(v)] \end{aligned}$$

3. **Ricerca della Risposta:** Cercare o inferire da una base di conoscenza l'entità x che soddisfa questa query complessa.

La ricorsione nella domanda deve essere trasformata in una query con binding di variabili appropriati che riflettono la struttura di annidamento.

Approcci Basati su Parsing Semantico

Sistemi come SEMPRE (Semantic Parsing with Execution) convertono domande in linguaggio naturale in query logiche formali eseguibili. Per gestire domande ricorsivamente complesse, questi sistemi:

1. Usano parsing compositivo dove il significato di ogni costituente è derivato composizionalmente
2. Mantengono variabili e binding attraverso livelli di annidamento
3. Generano query che preservano la struttura gerarchica dell'informazione richiesta

Neural QA e Reasoning Implicito

Modelli neurali moderni per QA, come BERT fine-tuned su dataset QA, gestiscono la ricorsione in modo più implicito. Quando presentati con una domanda complessa e un passaggio di testo, questi modelli:

1. Codificano sia la domanda che il passaggio in rappresentazioni dense
2. Usano attention per identificare span di testo rilevanti
3. Producono una risposta basata su pattern appresi nei dati di training

Questi modelli possono gestire domande con annidamento moderato (1-2 livelli) molto bene, ma mostrano degradazione su domande con annidamento profondo (3+ livelli), specialmente quando la risposta richiede ragionamento attraverso multipli passi di inferenza.

3.4.2 Knowledge Graphs e Query Ricorsive

I knowledge graphs (grafi di conoscenza) come DBpedia, Wikidata, e Freebase organizzano informazione fattuale in strutture di grafi dove nodi rappresentano entità e archi rappresentano relazioni. Le query su questi grafi possono richiedere traversals ricorsivi complessi.

Consideriamo la query: "Quali sono i nipoti dei fondatori di aziende che hanno acquisito startup fondate da studenti di MIT?"

Questa query richiede:

1. Trovare aziende che hanno acquisito startup
2. Per ogni tale azienda, trovare i suoi fondatori
3. Per ogni fondatore, trovare i suoi nipoti (relazione familiare)
4. Filtrare per startup fondate da studenti di MIT

Linguaggi di query come SPARQL permettono di esprimere tali query ricorsive:

```
SELECT ?nipote WHERE {
  ?azienda acquisito ?startup .
  ?startup fondataDa ?persona .
  ?persona studiatoA MIT .
  ?azienda fondataDa ?fondatore .
  ?fondatore nipote ?nipote .
}
```

Le query SPARQL possono incorporare pattern ricorsivi attraverso:

- Path expressions che permettono traversal di archi multipli
- Subqueries che possono essere annidate arbitrariamente
- Union e optional patterns che creano strutture di matching complesse

Property Paths Ricorsivi

SPARQL 1.1 introduce "property paths" che supportano traversal ricorsivo esplicito attraverso il grafo. L'operatore * indica zero o più ripetizioni di un path:

```
?persona (^fondataDa/acquisito)* ?compagnia .
```

Questo trova tutte le compagnie raggiungibili da una persona attraverso una catena arbitrariamente lunga di relazioni inverse di "fondataDa" seguite da "acquisito".

Questi path ricorsivi sono potenti ma computazionalmente costosi, potenzialmente richiedendo traversal di porzioni enormi del grafo.

3.5 Dialogue Systems e Gestione del Contesto Ricorsivo

I sistemi di dialogo conversazionale devono gestire strutture ricorsive sia a livello di singoli turni (frasi complesse con annidamento) sia a livello di struttura dialogica (topic annidati, sub-dialogue, parentetiche).

3.5.1 Dialogue State Tracking con Annidamento di Slot

Nei dialogue systems orientati a task (come assistenti virtuali per prenotazioni, customer service, ecc.), il sistema deve tracciare lo "stato del dialogo" -- quali informazioni sono state fornite dall'utente, quali slot devono ancora essere riempiti, quali azioni devono essere eseguite.

Quando i task sono complessi e gerarchicamente strutturati, il dialogue state stesso può avere struttura ricorsiva. Per esempio, in un sistema di prenotazione viaggi:

```
Stato_Dialogo = {
  tipo: "prenotazione_viaggio",
  destinazione: "Parigi",
  periodo: {
    partenza: "15 maggio",
    ritorno: "22 maggio"
  },
  volo: {
    partenza: {
      da: "Milano",
      a: "Parigi",
      data: "15 maggio",
      preferenze: {
        orario: "mattina",
        classe: "economy"
      }
    },
    ritorno: {
      da: "Parigi",
      a: "Milano",
      data: "22 maggio",
      preferenze: {
        orario: "sera",
        classe: "economy"
      }
    }
  }
}
```

```

hotel: {
  città: "Parigi",
  check_in: "15 maggio",
  check_out: "22 maggio",
  preferenze: {
    stelle: 4,
    posizione: "centro"
  }
}
}

```

Questa struttura di stato ha molteplici livelli di annidamento. Le interazioni dell'utente possono aggiornare informazione a qualsiasi livello:

User: "Voglio un volo per Parigi." → Aggiorna destinazione e volo.partenza.a

User: "Partenza il 15 maggio, ritorno il 22." → Aggiorna volo.partenza.data e volo.ritorno.data

User: "Preferisco voli mattutini per l'andata." → Aggiorna volo.partenza.preferenze.orario

Il sistema deve gestire questi aggiornamenti gerarchici e porre domande di chiarimento che sono appropriate per il livello corrente della gerarchia.

3.5.2 Gestione di Sub-Dialogue e Topic Shifts Ricorsivi

Nelle conversazioni naturali, i partecipanti frequentemente intraprendono "sub-dialogues" -- digressioni temporanee dal topic principale che possono esse stesse contenere ulteriori sub-topic. Questa struttura è intrinsecamente ricorsiva.

Esempio di conversazione con sub-dialogue annidati:

A: Allora, hai deciso dove andare in vacanza quest'estate?
 B: Stavo pensando alla Grecia.
 A: Oh, la Grecia è bellissima! Ci sono stato l'anno scorso.
 B: Davvero? Dove precisamente?
 A: A Santorini. (Inizio sub-dialogue 1: esperienza di A a Santorini)
 B: Come ci sei arrivato?
 A: Ho preso un volo da Milano a Atene, poi un traghetto.
 B: Il volo era diretto?
 A: No, con scalo a Roma. (Inizio sub-dialogue 2: dettagli del volo)
 B: Quanto tempo di scalo?
 A: Circa due ore.
 B: Comodo. (Fine sub-dialogue 2)
 A: Sì, e il traghetto da Atene a Santorini è stato spettacolare.
 B: Quanto dura?
 A: Circa 5 ore. (Fine sub-dialogue 1)
 B: Interessante. Penso proprio che andrò lì anch'io!

A: Ottima scelta! Ti piacerà sicuramente. (Ritorno al topic principale)

Un dialogue system sofisticato deve mantenere uno "stack" di topic attivi, simile a uno stack di chiamate di funzioni in programmazione:

[Topic_Principale: Vacanza_Estate_di_B]
 → [Sub_1: Esperienza_A_Santorini]
 → [Sub_2: Dettagli_Volo_A]

Quando un sub-dialogue si conclude, il sistema deve "pop" quello stack e riprendere il topic genitore. Questo richiede:

1. Riconoscere quando un nuovo sub-topic è iniziato
2. Mantenere contesto del topic genitore mentre si elabora il sub-topic
3. Riconoscere quando il sub-topic è concluso
4. Riprendere appropriatamente il topic genitore

3.5.3 Riferimenti Anaforici attraverso Confini di Sub-Dialogue

Un aspetto particolarmente complesso è la gestione di riferimenti anaphorici (pronomi, "quello", ecc.) quando attraversano confini di sub-dialogue. Consideriamo:

A: Sto cercando un buon ristorante giapponese.

B: Ce n'è uno ottimo in via Garibaldi.

A: A proposito, hai visto Maria ultimamente? (sub-dialogue)

B: Sì, l'ho incontrata ieri al supermercato.

A: Come sta?

B: Bene, mi ha detto che ha iniziato un nuovo lavoro. (fine sub-dialogue)

A: Torniamo al ristorante. Come si chiama? (riferimento anaforico al topic precedente il sub-dialogue)

Il "come si chiama?" si riferisce al ristorante menzionato due turni prima che il sub-dialogue su Maria iniziasse. Il sistema deve mantenere traccia che "ristorante in via Garibaldi" è ancora il referente saliente nel contesto del topic principale, anche se è stato temporaneamente messo da parte durante il sub-dialogue.

3.6 Applicazioni Emergenti: Code Generation e Program Synthesis

Una delle applicazioni più recenti e promettenti dell'elaborazione del linguaggio naturale è la generazione automatica di codice da descrizioni in linguaggio naturale. Questo task è intrinsecamente connesso alla ricorsione perché:

1. Molti programmi hanno struttura ricorsiva (funzioni che chiamano se stesse)
2. Le descrizioni di algoritmi ricorsivi richiedono espressione linguistica di concetti ricorsivi
3. Il codice stesso ha struttura gerarchica profondamente annidata

3.6.1 Da Linguaggio Naturale a Codice Ricorsivo

Modelli come Codex (GPT-3 fine-tuned su codice), GPT-4, e Claude possono generare implementazioni di funzioni ricorsive da descrizioni testuali. Esempio:

Input (linguaggio naturale): "Scrivi una funzione Python ricorsiva che calcola il fattoriale di un numero n."

Output (codice):

```
def fattoriale(n):
    if n == 0 or n == 1:
        return 1
    else:
        return n * fattoriale(n - 1)
```

Il modello deve:

1. Comprendere il concetto di fattoriale (una nozione matematica ricorsiva)
2. Riconoscere che una soluzione ricorsiva è appropriata
3. Implementare il caso base (n=0 o n=1)
4. Implementare il caso ricorsivo (n * fattoriale(n-1))
5. Assicurarci che la ricorsione termini (n decrementato ad ogni chiamata)

Generazione di Strutture di Dati Ricorsive

Modelli di code generation possono anche generare definizioni di strutture di dati ricorsive. Per esempio:

Input: "Definisci una classe Python per un albero binario con nodi che contengono valori interi."

Output:

```
class NodoAlbero:
    def __init__(self, valore):
        self.valore = valore
        self.sinistro = None
        self.destro = None
```

E poi implementare operazioni ricorsive su queste strutture:

Input: "Scrivi una funzione che calcola l'altezza di un albero binario."

Output:

```
def altezza_albero(nodo):
    if nodo is None:
```

```

    return 0
else:
    altezza_sinistra = altezza_albero(nodo.sinistro)
    altezza_destra = altezza_albero(nodo.destro)
    return 1 + max(altezza_sinistra, altezza_destra)

```

Questa funzione è ricorsiva classica con:

- Caso base: nodo vuoto ha altezza 0
- Caso ricorsivo: altezza di un nodo è 1 + massimo delle altezze dei suoi sottoalberi

3.6.2 Verifica e Debugging di Codice Ricorsivo

I modelli linguistici moderni possono anche aiutare nel debugging di codice ricorsivo, che è notoriamente difficile per i programmatori umani. Quando presentati con codice ricorsivo buggy e una descrizione dell'errore, i modelli possono:

1. Identificare errori comuni come:
 - Casi base mancanti o incorretti (che portano a ricorsione infinita)
 - Condizioni di terminazione sbagliate
 - Errori nella combinazione dei risultati ricorsivi
2. Suggerire fix appropriati
3. Spiegare in linguaggio naturale perché il codice era sbagliato e come il fix risolve il problema

Esempio:

Input (codice buggy):

```

def somma_lista(lista):
    if len(lista) == 1:
        return lista[0]
    else:
        return lista[0] + somma_lista(lista) # Bug: ricorsione infinita!

```

Query: "Questo codice va in ricorsione infinita. Puoi trovare il bug e spiegarlo?"

Output del modello: "Il bug è nella riga del caso ricorsivo. La funzione chiama `somma_lista(lista)` passando l'intera lista, invece di passare la lista senza il primo elemento. Questo significa che la lista non diventa mai più piccola, quindi la condizione di base `len(lista) == 1` non viene mai raggiunta, causando ricorsione infinita.

La riga dovrebbe essere:

```
return lista[0] + somma_lista(lista[1:])
```

Questo rimuove il primo elemento ad ogni chiamata ricorsiva, eventualmente riducendo la lista a un singolo elemento e terminando la ricorsione."

3.7 Sfide Aperte e Direzioni Future

Nonostante i progressi significativi nell'implementazione computazionale della ricorsione linguistica, rimangono sfide importanti e opportunità per ricerca futura.

3.1.1 Generalizzazione Sistematica oltre i Dati di Training

Una critica persistente ai modelli neurali è la loro dipendenza da grandi quantità di dati di training. Per strutture ricorsive profondamente annidate che sono rare nei dati naturali, i modelli mostrano prestazioni degradate. Questo solleva la questione se questi modelli abbiano veramente "appreso" la ricorsione come principio generale compositivo, o semplicemente abbiano memorizzato pattern statistici su strutture che appaiono nei dati.

Ricerca futura dovrebbe esplorare:

- Architetture che incorporano bias induttivi verso composizionalità e ricorsione
- Tecniche di data augmentation che generano sistematicamente esempi con vari livelli di annidamento ricorsivo
- Metodi di valutazione che testano specificatamente la generalizzazione a profondità di ricorsione non viste

3.1.2 Interpretabilità delle Rappresentazioni Ricorsive

Mentre sappiamo che i modelli neurali moderni possono gestire strutture ricorsive con qualche successo, le loro rappresentazioni interne rimangono largamente opache. Comprendere come questi modelli rappresentano e computano strutture ricorsive potrebbe:

- Informare lo sviluppo di architetture migliori
- Fornire insights su come il cervello umano potrebbe rappresentare ricorsione
- Permettere diagnosi e correzione di errori sistematici

Tecniche promettenti includono:

- Probing di rappresentazioni hidden per informazione sintattica strutturale
- Visualizzazione di pattern di attention in relazione a strutture ricorsive
- Analisi di comportamento su datasets sintetici attentamente controllati

3.1.3 Integrazione di Approcci Simbolici e Neurali

Un'area particolarmente promettente è l'integrazione di approcci simbolici (che hanno forti garanzie su composizionalità e ricorsione) con approcci neurali (che hanno robustezza e capacità di generalizzazione). Architetture ibride potrebbero combinare:

- Moduli neurali per encoding di input linguistico e decoding di output

- Moduli simbolici per ragionamento strutturato e manipolazione ricorsiva
- Meccanismi di interfaccia tra rappresentazioni neurali e simboliche

Questa direzione potrebbe portare a sistemi che combinano la robustezza e flessibilità degli approcci neurali con le garanzie formali e la trasparenza degli approcci simbolici.

CONCLUSIONI DEL CAPITOLO 3

L'implementazione computazionale della ricorsione linguistica ha fatto progressi straordinari negli ultimi decenni, dai primi parser basati su regole ai moderni sistemi neurali capaci di generare e comprendere linguaggio con fluenza quasi umana. Tuttavia, la ricorsione rimane una sfida centrale, specialmente per strutture profondamente annidate che si discostano dai pattern statistici dominanti nei dati di training.

Le applicazioni pratiche di questi sistemi -- da traduzione automatica a question answering, da dialogue systems a code generation -- dimostrano il valore di implementare capacità ricorsive. Allo stesso tempo, i limiti e le lacune di questi sistemi illuminano aspetti della ricorsione che rimangono mal compresi e difficili da catturare computazionalmente.

La continua evoluzione di architetture neurali, combinate con insights dalla linguistica formale e dalle scienze cognitive, promette ulteriori progressi. La ricorsione linguistica rimane un fenomeno profondo che continua a sfidare e ispirare ricercatori attraverso molteplici discipline.

CAPITOLO 4: DIMENSIONI AVANZATE DELLA RICORSIONE LINGUISTICA

4.1 Acquisizione della Ricorsione nel Bambino: Uno Studio Approfondito

L'acquisizione della capacità ricorsiva rappresenta una delle questioni più affascinanti e teoricamente rilevanti nello studio dello sviluppo linguistico infantile. Comprendere quando e come i bambini padroneggiano strutture ricorsive fornisce insights cruciali non solo sui meccanismi di acquisizione linguistica, ma anche sulla natura stessa della ricorsione: è una capacità innata che matura biologicamente, o emerge gradualmente dall'interazione con l'input linguistico e dallo sviluppo di capacità cognitive più generali?

4.1.1 Fasi dello Sviluppo Ricorsivo

Le ricerche empiriche sull'acquisizione linguistica hanno rivelato un pattern di sviluppo relativamente consistente attraverso bambini di lingue diverse, sebbene con variazioni importanti nei dettagli e nei tempi precisi. Questo pattern suggerisce che l'acquisizione della ricorsione non è un evento discreto che accade "tutto in una volta", ma piuttosto un processo graduale che si estende su diversi anni dell'infanzia.

Fase 1: Enunciati a Una Parola (Olofrastici) - 12-18 mesi

Nella fase iniziale dello sviluppo linguistico produttivo, i bambini producono enunciati costituiti da singole parole o espressioni formulaiche. "Mamma", "pappa", "più", "no". Questi enunciati, sebbene morfologicamente semplici, possono avere funzioni comunicative complesse, ma non mostrano alcuna evidenza di struttura sintattica interna, tantomeno di ricorsione.

Fase 2: Enunciati a Due Parole e Grammatica Telegrafica - 18-24 mesi

Intorno ai 18-24 mesi, i bambini iniziano a combinare parole in enunciati multi-parola. Inizialmente, queste combinazioni sono semplici giustapposizioni: "mamma pappa", "più latte", "no nanna". La struttura è prevalentemente parattatica (coordinativa) piuttosto che ipotattica (subordinata). Non c'è ancora evidenza di embedding ricorsivo.

Tuttavia, anche in questa fase precoce, i bambini mostrano sensibilità all'ordine delle parole e alle relazioni sintattiche di base. In lingue SVO come l'italiano, i bambini tendono a rispettare l'ordine Soggetto-Verbo-Oggetto: "bambino mangia pappa" piuttosto che ordinamenti scrambled. Questo suggerisce che stanno costruendo rappresentazioni sintattiche, anche se rudimentali.

Fase 3: Prime Subordinazioni - 24-30 mesi

Tra i due e i due anni e mezzo, emergono le prime forme di subordinazione, tipicamente attraverso costruzioni complete semplici con verbi di desiderio, volizione, o percezione. In italiano, si osservano enunciati come:

"Voglio andare fuori" "Vedo mamma arrivare" "Posso prendere biscotto"

Queste costruzioni, sebbene contengano due verbi e quindi potrebbero sembrare ricorsive, sono spesso analizzate come costruzioni di controllo piuttosto che come genuino embedding di clausole complete. Il soggetto del verbo subordinato è interpretato come co-referenziale con il soggetto o l'oggetto del verbo principale, e i bambini potrebbero non rappresentare mentalmente queste costruzioni come contenenti due clausole separate ma piuttosto come sequenze di verbi all'interno di una singola struttura.

Fase 4: Proposizioni Relative Semplici - 30-42 mesi

Le proposizioni relative rappresentano la prima manifestazione chiaramente ricorsiva nella produzione linguistica infantile. Tuttavia, la loro acquisizione è graduale e procede attraverso sotto-fasi distinte:

Sotto-fase 4a: Relative sul Soggetto (Subject Relatives) - circa 30-36 mesi

Le prime proposizioni relative che i bambini producono spontaneamente tendono ad essere relative sul soggetto della clausola relativa, cioè dove l'elemento relativizzato funziona come soggetto del verbo nella clausola relativa:

"Il cane che corre è grande" "La bambina che piange vuole la mamma" "Il libro che cade fa rumore"

In queste costruzioni, il sintagma nominale modificato dalla relativa ("il cane", "la bambina", "il libro") è l'agente o esperiente del verbo nella clausola relativa. Questo tipo di relativa è relativamente facile da processare perché l'ordine delle parole nella clausola relativa rispecchia l'ordine canonico SVO della lingua: "che corre" ha lo stesso ordine di una clausola indipendente "X corre", con il pronome relativo "che" che prende il posto del soggetto.

Sotto-fase 4b: Relative sull'Oggetto (Object Relatives) - circa 36-48 mesi

Significativamente più tardi, i bambini iniziano a produrre proposizioni relative sull'oggetto, dove l'elemento relativizzato funziona come oggetto del verbo nella clausola relativa:

"Il cane che il gatto insegue è veloce" "La bambola che la bambina tiene è rotta" "Il libro che Paolo legge è lungo"

Queste costruzioni sono computazionalmente più complesse perché l'ordine delle parole nella clausola relativa è perturbato rispetto all'ordine canonico. In "che il gatto insegue", l'oggetto "che" (co-referente con "il cane") appare prima del soggetto "il gatto", invertendo l'ordine SVO normale. Questo richiede che il bambino tenga traccia di una dipendenza a lunga distanza tra il pronome relativo e la sua posizione semantica come oggetto del verbo.

Studi sperimentali di comprensione hanno confermato questa asimmetria: bambini di 3-4 anni interpretano correttamente relative sul soggetto significativamente più spesso di relative sull'oggetto. In un esperimento classico di Hamburger e Crain (1982), bambini di 3-5 anni udivano frasi come "Il cavallo che la mucca spinge è marrone" (relativa sull'oggetto) e dovevano identificare quale di due immagini corrispondeva alla frase. I bambini più piccoli tendevano erroneamente a interpretare queste frasi come se fossero relative sul soggetto, scegliendo l'immagine dove il cavallo (menzionato primo) spingeva la mucca, piuttosto che quella corretta dove la mucca spingeva il cavallo.

Fase 5: Complementi Frasali - 36-48 mesi

Parallelamente all'acquisizione delle proposizioni relative, i bambini iniziano a produrre complementi frasali introdotti da congiunzioni subordinanti come "che", "perché", "quando", "se":

"Penso che mamma arriva" "Piango perché voglio il gelato" "Quando papà torna giochiamo" "Se piove non usciamo"

Queste costruzioni dimostrano la capacità di embedding di una clausola completa all'interno di un'altra, con soggetti e predicati distinti a ciascun livello. Questa è genuina ricorsione sintattica: la regola $S \rightarrow NP VP$ può applicarsi ricorsivamente perché VP può contenere un complemento frasale che è esso stesso una S.

Fase 6: Ricorsione Multipla e Strutture Complesse - 48+ mesi

Dopo i 4 anni, i bambini iniziano gradualmente a produrre strutture con multipli livelli di embedding, sebbene queste rimangano relativamente rare anche nel linguaggio di bambini in età scolare. Esempi includono:

"Il bambino che ha detto che vuole uscire è mio fratello" (relativa contenente una completiva)

"Penso che Maria crede che Paolo ha ragione" (completiva contenente completiva)

"Il libro che il ragazzo che conosco ha scritto è interessante" (relativa contenente relativa - center-embedding)

Tuttavia, anche i bambini che producono occasionalmente queste strutture complesse mostrano difficoltà considerevoli con il center-embedding profondo, rispecchiando i limiti osservati negli adulti. Strutture con 3+ livelli di center-embedding sono estremamente rare nella produzione spontanea infantile e sono difficili da comprendere anche per bambini di 7-8 anni.

4.1.2 Dissociazione tra Comprensione e Produzione

Un pattern robusto che emerge dalla ricerca sull'acquisizione è che la comprensione di strutture ricorsive tipicamente precede la produzione spontanea. Bambini che non producono ancora proposizioni relative nel loro linguaggio spontaneo possono nondimeno dimostrare comprensione di tali strutture in esperimenti controllati.

In uno studio influente, Crain, McKee e Emiliani (1990) testarono la comprensione di proposizioni relative in bambini italiani di 2,5-5 anni usando una metodologia di "act-out" dove i bambini dovevano rappresentare con giocattoli le azioni descritte in frasi che udivano. Bambini già a 3 anni mostravano comprensione accurata di relative semplici sul soggetto, e bambini di 4 anni comprendevano correttamente anche relative sull'oggetto, nonostante molti di questi bambini non producessero ancora tali strutture spontaneamente.

Questa dissociazione comprensione-produzione suggerisce che la competenza sintattica sottostante per la ricorsione può essere presente prima che i bambini abbiano sviluppato le abilità di pianificazione e produzione motoria necessarie per articolare queste strutture complesse. In altre parole, il "collo di bottiglia" nello sviluppo ricorsivo potrebbe risiedere più nelle limitazioni di performance (memoria di lavoro, controllo articolatorio, pianificazione del discorso) che nella competenza grammaticale di base.

Tuttavia, bisogna essere cauti nel trarre conclusioni troppo forti da questi dati. Alcuni ricercatori hanno argomentato che i compiti di comprensione potrebbero essere risolti attraverso strategie euristiche piuttosto che attraverso genuina computazione sintattica ricorsiva. Per esempio, in "Il cane che il gatto insegue è veloce", un bambino potrebbe usare la strategia "il primo nome è l'agente" (interpretando il cane come inseguitore) o potrebbe fare affidamento su conoscenze pragmatiche sul mondo (gatti più probabilmente inseguono cani che viceversa) piuttosto che computare correttamente la struttura sintattica.

4.1.3 Il Ruolo dell'Input Linguistico

Una questione cruciale riguarda il ruolo dell'input linguistico nell'acquisizione della ricorsione. I bambini sono esposti a strutture ricorsive nell'input che ricevono? E se sì, la frequenza e la complessità di queste strutture nell'input predice il corso dell'acquisizione?

Studi di corpus del linguaggio diretto ai bambini (child-directed speech, CDS) hanno rivelato che i caregivers usano effettivamente strutture ricorsive quando parlano con bambini piccoli, sebbene con frequenza moderata e tipicamente limitata a forme relativamente semplici.

Proposizioni relative semplici, complementi frasali con "che", e costruzioni complete con verbi di volizione ("vuoi che...") appaiono regolarmente nel CDS.

Tuttavia, la frequenza di strutture ricorsive nel CDS varia considerevolmente tra culture e stili parentali. In alcune culture, il linguaggio diretto ai bambini piccoli è semplificato in modi che minimizzano la complessità sintattica, incluso l'uso di subordinazione. In altre culture, gli adulti usano un linguaggio più complesso anche con bambini molto piccoli.

Studi longitudinali che correlano le caratteristiche dell'input con il corso dell'acquisizione hanno trovato evidenze miste. Alcuni studi riportano correlazioni positive moderate: bambini esposti a più input con subordinazione complessa tendono ad acquisire queste strutture leggermente prima. Tuttavia, l'effetto è tipicamente piccolo, e tutti i bambini alla fine acquisiscono capacità ricorsive indipendentemente dalla complessità dell'input, suggerendo che fattori maturazionali interni giocano un ruolo significativo.

Un esperimento particolarmente informativo è quello di Vasilyeva, Huttenlocher e Waterfall (2006), che manipolarono sperimentalmente l'input fornendo a bambini di 4-5 anni training intensivo con proposizioni relative complesse. I bambini nel gruppo sperimentale ricevettero esposizione a 96 esempi di relative sull'oggetto in sessioni di gioco strutturate nel corso di 4 settimane. I bambini nel gruppo di controllo ricevettero la stessa quantità di interazione ma con frasi sintatticamente più semplici.

I risultati mostrarono che i bambini nel gruppo sperimentale migliorarono significativamente nella produzione e comprensione di relative sull'oggetto rispetto al gruppo di controllo, e questo miglioramento si manteneva in follow-up condotti 2 settimane e 2 mesi dopo il training. Questo dimostra che l'input linguistico può accelerare l'acquisizione di strutture ricorsive specifiche.

Tuttavia, è importante notare che non tutti i bambini beneficiarono ugualmente del training. I bambini con capacità di memoria di lavoro più elevate (misurate indipendentemente attraverso compiti di span di cifre e span di frasi) mostrarono guadagni molto maggiori dal training rispetto a bambini con memoria di lavoro più limitata. Questo suggerisce un'interazione tra fattori di input e fattori cognitivi individuali nell'acquisizione della ricorsione.

4.1.4 Vincoli Cognitivi Generali e Maturazione

Una prospettiva alternativa o complementare enfatizza il ruolo di vincoli cognitivi generali e di processi maturazionali biologici nell'acquisizione della ricorsione. Secondo questa visione, la capacità di rappresentare e manipolare strutture gerarchicamente annidate richiede abilità cognitive che si sviluppano gradualmente durante l'infanzia, indipendentemente dall'input linguistico specifico.

Le abilità cognitive rilevanti includono:

Memoria di Lavoro: Come discusso precedentemente, il processamento di strutture ricorsive, specialmente con center-embedding, impone richieste significative sulla memoria di lavoro. I bambini piccoli hanno capacità di memoria di lavoro sostanzialmente più limitate degli adulti, e queste capacità migliorano progressivamente durante l'infanzia e

l'adolescenza. Correlazioni tra misure di memoria di lavoro e abilità con strutture ricorsive sono state documentate ripetutamente.

Capacità di Inibizione e Controllo Esecutivo: L'interpretazione corretta di strutture ricorsive richiede spesso l'inibizione di interpretazioni errate ma superficialmente plausibili. Per esempio, in "Il cane che il gatto insegue è veloce", i bambini devono inibire la tendenza a interpretare il primo nome come agente. Le capacità di controllo inibitorio si sviluppano gradualmente durante l'infanzia, con miglioramenti significativi tra i 3 e i 6 anni.

Teoria della Mente Ricorsiva: Alcuni ricercatori hanno proposto collegamenti tra lo sviluppo della teoria della mente (la capacità di attribuire stati mentali ad altri) e l'acquisizione di strutture linguistiche ricorsive. Entrambe le abilità coinvolgono rappresentazioni annidate ricorsivamente (credenze su credenze nella teoria della mente; clausole in clausole nella sintassi) e entrambe si sviluppano durante lo stesso periodo dell'infanzia. Studi correlazionali hanno trovato associazioni moderate tra prestazioni in compiti di falsa credenza (un test standard di teoria della mente) e comprensione di strutture sintattiche complesse, sebbene la natura causale di questa relazione rimanga dibattuta.

Rappresentazione Gerarchica Generale: Al livello più astratto, la ricorsione sintattica richiede la capacità di rappresentare strutture gerarchicamente organizzate dove un elemento di tipo X può contenere al suo interno un altro elemento dello stesso tipo X. Questa capacità di rappresentazione gerarchica potrebbe essere dominio-generale piuttosto che specifica al linguaggio. Bambini mostrano progressi in rappresentazione gerarchica in molteplici domini durante l'età prescolare: nella categorizzazione (categorie che contengono sotto-categorie), nell'organizzazione di azioni in piani e sottopiani, nella comprensione di relazioni di inclusione spaziale, eccetera.

Un'ipotesi integrativa, proposta da ricercatori come Adele Goldberg e Michael Tomasello, è che l'acquisizione della ricorsione linguistica emerga dall'interazione di:

1. Esposizione a input linguistico contenente strutture ricorsive
2. Sviluppo maturazionale di capacità cognitive generali (memoria di lavoro, controllo esecutivo, rappresentazione gerarchica)
3. Meccanismi di apprendimento generale (riconoscimento di pattern, analogia, generalizzazione basata sull'uso)

Secondo questa prospettiva costruttivista, la ricorsione non è un modulo sintattico innato che "si accende" a una certa età, ma piuttosto una capacità complessa che emerge gradualmente quando i bambini estraggono pattern ricorrenti dall'input linguistico usando capacità cognitive in sviluppo.

4.2 Patologie Linguistiche e Deficit Ricorsivi

Lo studio di popolazioni con deficit linguistici fornisce una finestra preziosa sulla natura della ricorsione e sulla sua relazione con altre capacità cognitive. Se la ricorsione è davvero centrale al linguaggio umano, ci aspetteremmo che disturbi che compromettono gravemente il linguaggio mostrino deficit specifici con strutture ricorsive. Al contrario, dissociazioni tra abilità ricorsive e altre abilità linguistiche o cognitive possono informare teorie sulla modularità e l'organizzazione funzionale del sistema linguistico.

4.2.1 Afasia di Broca e Comprensione Sintattica

L'afasia di Broca, risultante tipicamente da lesioni al giro frontale inferiore sinistro e aree adiacenti, è classicamente caratterizzata da produzione linguistica non fluente, agrammatica, e faticosa. I pazienti con afasia di Broca omettono frequentemente elementi funzionali (articoli, preposizioni, ausiliari) e morfologia grammaticale (flessioni verbali, marcatori di accordo), producendo un "stile telegrafico" che ricorda il linguaggio di bambini molto piccoli.

Ma ciò che è particolarmente rilevante per la nostra discussione sulla ricorsione è che molti pazienti con afasia di Broca, sebbene mostrino preservazione relativamente buona della comprensione di frasi semplici, mostrano deficit severi nella comprensione di frasi sintatticamente complesse, specialmente quelle che coinvolgono dipendenze a lunga distanza e strutture annidate.

Deficit con Relative sull'Oggetto e Passivi

Uno dei pattern più robusti nell'afasia di Broca è la difficoltà selettiva con strutture sintattiche che richiedono movimento o dipendenze non canoniche. In particolare, i pazienti mostrano difficoltà severe con:

- Proposizioni relative sull'oggetto: "Il ragazzo che la ragazza bacia è alto"
- Frasi passive: "Il ragazzo è baciato dalla ragazza"
- Domande wh sull'oggetto: "Chi ha baciato il ragazzo?"

Mentre conservano comprensione relativamente buona di:

- Proposizioni relative sul soggetto: "Il ragazzo che bacia la ragazza è alto"
- Frasi attive: "La ragazza bacia il ragazzo"
- Domande wh sul soggetto: "Chi ha baciato la ragazza?"

Questa dissociazione non può essere spiegata semplicemente in termini di lunghezza della frase o complessità lessicale, poiché le frasi problematiche e quelle preservate hanno complessità comparabile lungo queste dimensioni. Piuttosto, la distinzione critica sembra riguardare la struttura sintattica: le costruzioni problematiche richiedono l'elaborazione di dipendenze non canoniche dove un elemento appare in una posizione sintattica che non corrisponde alla sua posizione semantica o tematica.

Nella framework della grammatica generativa, queste costruzioni coinvolgono "movimento" di costituenti da una posizione di base a una posizione derivata, lasciando una "traccia" nella posizione originale. Per esempio, in "Il ragazzo che la ragazza bacia t", l'oggetto diretto "che" (coreferente con "il ragazzo") appare all'inizio della clausola relativa ma deve essere interpretato come l'oggetto di "bacia", creando una dipendenza a lunga distanza tra il pronome relativo e la traccia t.

Test Sperimentali e Pattern di Performance

Studi sperimentali sistematici hanno confermato e quantificato questi deficit. In uno studio classico di Caramazza e Zurif (1976), pazienti con afasia di Broca udivano frasi come:

1. "Il cavallo che insegue la mucca è marrone" (relativa sul soggetto)
2. "Il cavallo che la mucca insegue è marrone" (relativa sull'oggetto)

E dovevano identificare quale di due immagini corrispondeva alla frase. I pazienti performavano al livello del caso (50%) sulla frase 2, indicando completa perdita della capacità di interpretare correttamente la struttura sintattica, mentre performavano molto meglio (circa 80-90% corretto) sulla frase 1.

Criticamente, quando gli sperimentatori modificavano le frasi per ridurre la plausibilità di interpretazioni errate basate su euristiche semantiche, la performance dei pazienti peggiorava ulteriormente. Per esempio, con frasi reversibili dove entrambi i nomi potrebbero plausibilmente essere agente o paziente ("Il ragazzo che la ragazza bacia"), i pazienti performavano al caso, mentre con frasi non-reversibili dove solo un nome poteva plausibilmente essere l'agente ("L'albero che il ragazzo pianta"), i pazienti potevano a volte arrivare alla risposta corretta usando strategie semantiche piuttosto che analisi sintattica.

Implicazioni per la Ricorsione

Questi deficit hanno implicazioni importanti per la nostra comprensione della ricorsione. Suggestiscono che le regioni cerebrali danneggiate nell'afasia di Broca (specialmente l'area di Broca stessa e circuitaria associata) sono cruciali per aspetti specifici del processamento ricorsivo -- in particolare, per gestire dipendenze a lunga distanza che attraversano confini di clausole annidate.

Tuttavia, è importante notare che non tutti gli aspetti della ricorsione sono ugualmente compromessi. Pazienti con afasia di Broca tipicamente conservano la capacità di comprendere frasi con complementi frasali semplici come "Giovanni sa che Maria arriva" (dove la subordinazione è right-branching e non richiede dipendenze non canoniche) molto meglio di quanto comprendano relative sull'oggetto o passivi. Questo suggerisce che il deficit non è con la ricorsione di per sé, ma piuttosto con la combinazione di ricorsione e dipendenze a lunga distanza che richiedono riordino o rianalisi.

4.2.2 Disturbo Specifico del Linguaggio (SLI/DLD)

Il Disturbo Specifico del Linguaggio (Specific Language Impairment - SLI), ora più comunemente chiamato Developmental Language Disorder (DLD), è una condizione dove i bambini mostrano deficit significativi nello sviluppo linguistico in assenza di altre condizioni che tipicamente causano ritardi linguistici (perdita uditiva, deficit intellettivo, danno neurologico, disturbo dello spettro autistico, privazione ambientale severa).

I bambini con DLD mostrano pattern di deficit linguistici eterogenei, ma un profilo comune include difficoltà marcate con morfosintassi grammaticale. In inglese, i bambini con DLD notoriamente omettono morfemi grammaticali obbligatori come il marcatore di terza persona singolare -s ("He walk*" invece di "He walks"), ausiliari ("He walking" invece di "He is walking"), e il morfema del passato -ed ("He walk yesterday" invece di "He walked yesterday").

Deficit con Strutture Ricorsive in DLD

Di particolare rilevanza per la nostra discussione, numerosi studi hanno documentato che i bambini con DLD hanno difficoltà sproporzionate con strutture sintattiche complesse che coinvolgono ricorsione ed embedding. Le difficoltà includono:

1. **Produzione di Proposizioni Relative:** Bambini con DLD producono significativamente meno proposizioni relative nel loro linguaggio spontaneo rispetto a bambini a sviluppo tipico matchati per età cronologica o anche matchati per età linguistica (basata su altre misure come MLU - Mean Length of Utterance).
2. **Comprensione di Relative sull'Oggetto:** Simile ai pazienti con afasia di Broca, i bambini con DLD mostrano particolare difficoltà nella comprensione di proposizioni relative sull'oggetto. In uno studio di Friedmann e Novogrodsky (2004), bambini con DLD di 9-11 anni performavano accuratamente (>85%) su relative sul soggetto ma performavano vicino al caso (~55%) su relative sull'oggetto, un pattern tipicamente osservato in bambini molto più giovani a sviluppo tipico (3-4 anni).
3. **Produzione di Complementi Frasali Annidati:** Quando richiesti di produrre frasi complesse con multipli livelli di embedding (per esempio, descrivendo situazioni che richiedono espressioni come "Maria pensa che Giovanni crede che..."), i bambini con DLD producono frasi significativamente più brevi e sintatticamente più semplici, spesso ricorrendo a sequenze di frasi coordinate indipendenti piuttosto che a subordinazione genuina.

Interpretazioni Teoriche

Il pattern di deficit osservato in DLD è stato interpretato in modi diversi da ricercatori con differenti orientamenti teorici:

Ipotesi del Deficit di Elaborazione (Processing Deficit Hypothesis): Questa prospettiva, associata a ricercatori come Leonard, Miller, e Bishop, propone che i bambini con DLD abbiano limitazioni nelle risorse di elaborazione cognitiva generale -- particolarmente memoria di lavoro fonologica e velocità di processamento -- che rendono difficile l'acquisizione e l'uso di strutture linguistiche complesse. La ricorsione è particolarmente vulnerabile perché impone carichi pesanti sulla memoria di lavoro.

Evidenze a supporto includono:

- Correlazioni tra misure di memoria di lavoro e abilità con strutture ricorsive in bambini con DLD
- Il fatto che i bambini con DLD performano meglio con strutture ricorsive quando il carico di memoria è ridotto (per esempio, frasi più brevi, presentazione rallentata)
- Pattern simili di deficit in compiti non-linguistici che richiedono elaborazione sequenziale complessa

Ipotesi del Deficit Grammaticale (Grammatical Deficit Hypothesis): Una prospettiva alternativa, associata a ricercatori come Van der Lely e Rice, propone che i bambini con DLD abbiano un deficit specifico nei meccanismi computazionali grammaticali. Secondo versioni diverse di questa ipotesi, il deficit potrebbe riguardare:

- Rappresentazioni sintattiche sottostanti deboli o non completamente sviluppate
- Difficoltà specifiche con operazioni sintattiche come il movimento o il binding
- Problemi con l'interfaccia tra sintassi e morfologia

Evidenze a supporto includono:

- Specificità dei deficit a domini sintattici/morfologici piuttosto che a linguaggio in generale
- Dissociazioni tra abilità con strutture complesse e altre misure cognitive
- Pattern di deficit che rispecchiano stadi precoci di acquisizione piuttosto che semplicemente performance degradata

Prospettiva Integrativa: Sempre più ricercatori riconoscono che deficit di elaborazione e deficit grammaticali potrebbero coesistere e interagire in modi complessi. Bambini con DLD potrebbero avere sia limitazioni nelle risorse di elaborazione che rappresentazioni grammaticali più deboli, con ciascun fattore che contribuisce alle difficoltà osservate in proporzioni che variano tra individui.

4.2.3 Sindrome di Williams e Dissociazioni Cognitive

La sindrome di Williams è una condizione genetica rara (causata da una delezione sul cromosoma 7) caratterizzata da un profilo cognitivo distintivo e altamente inusuale: deficit intellettivi da lievi a moderati (QI tipicamente 50-70) con particolare debolezza nelle abilità visuo-spaziali, ma abilità linguistiche e sociali relativamente preservate che possono sembrare sproporzionatamente forti date le limitazioni cognitive generali.

Abilità Linguistiche in Williams Syndrome

Gli individui con sindrome di Williams tipicamente acquisiscono vocabolario espressivo ampio e mostrano eloquenza verbale notevole. Il loro linguaggio è spesso descritto come "cocktail party speech" -- grammaticalmente corretto, fluente, socialmente appropriato, ma talvolta semanticamente vuoto o tangenziale.

Criticamente per la nostra discussione sulla ricorsione, gli individui con sindrome di Williams producono e comprendono strutture sintatticamente complesse, incluse proposizioni relative e subordinazioni multiple, con relativa facilità. Studi hanno documentato che adolescenti e adulti con sindrome di Williams usano spontaneamente costruzioni con embedding ricorsivo nel loro linguaggio narrativo a frequenze comparabili o persino superiori a individui a sviluppo tipico matchati per età mentale.

In uno studio di Reilly, Klima e Bellugi (1990), individui con sindrome di Williams producevano narrazioni ricche di subordinazione complessa:

"La rana è saltata fuori dal barattolo che il bambino aveva lasciato aperto mentre dormiva, e è andata nella foresta dove c'era un gufo che viveva in un albero che aveva un buco grande."

Questa frase contiene multipli livelli di subordinazione relativa e completiva, indicando che la capacità ricorsiva è preservata.

Implicazioni Teoriche: Dissociazione tra Ricorsione e Cognizione Generale

La sindrome di Williams è stata interpretata da alcuni ricercatori, particolarmente nel campo chomskiano, come evidenza per la dissociazione tra facoltà linguistica (inclusa la capacità ricorsiva) e cognizione generale. Se individui con deficit intellettivi significativi possono nondimeno padroneggiare strutture linguistiche ricorsive complesse, l'argomento procede, allora la capacità ricorsiva non può dipendere da intelligenza generale o da capacità cognitive dominio-generalì come memoria di lavoro o elaborazione gerarchica astratta.

Steven Pinker, nel suo libro "The Language Instinct", usa la sindrome di Williams (insieme ad altri casi) per argomentare che il linguaggio è un "istinto" -- un modulo cognitivo specializzato e innato che può operare relativamente indipendentemente da altre capacità cognitive.

Critiche e Qualificazioni

Tuttavia, questa interpretazione è stata contestata su diverse basi:

1. **Preservazione Non Completa:** Analisi più attente hanno rivelato che mentre gli individui con sindrome di Williams usano effettivamente strutture ricorsive, mostrano sottili deficit nella comprensione e produzione di costruzioni particolarmente complesse. Per esempio, Karmiloff-Smith e colleghi hanno documentato difficoltà specifiche con relative sull'oggetto e con frasi passive in compiti sperimentali controllati, anche se queste difficoltà potrebbero non essere immediatamente evidenti nel linguaggio conversazionale spontaneo.
2. **Strategie Compensatorie:** È possibile che gli individui con sindrome di Williams raggiungano performance linguistica apparentemente buona usando strategie compensatorie e affidandosi pesantemente a formule memorizzate e chunking piuttosto che a computazione sintattica genuinamente compositiva.
3. **Profilo Cognitivo Non Uniforme:** Mentre gli individui con sindrome di Williams hanno deficit visuo-spaziali marcati, le loro abilità in altri domini cognitivi rilevanti per il linguaggio (come memoria fonologica, attenzione uditiva, cognizione sociale) possono essere relativamente preservate, complicando l'interpretazione di semplice dissociazione.
4. **Variabilità Individuale:** C'è considerevole variabilità nelle abilità linguistiche tra individui con sindrome di Williams, con alcuni che mostrano difficoltà linguistiche più evidenti di altri.

4.3 Ricorsione nelle Lingue dei Segni

Le lingue dei segni forniscono un terreno di prova cruciale per teorie sulla natura universale della ricorsione linguistica. Se la ricorsione è veramente una proprietà fondamentale della facoltà linguistica umana piuttosto che un epifenomeno della modalità vocale-uditiva del linguaggio, allora dovremmo osservare ricorsione nelle lingue dei segni che sono completamente indipendenti dal canale acustico.

4.3.1 Struttura Sintattica nelle Lingue dei Segni

Le ricerche linguistiche sulle lingue dei segni, iniziate sistematicamente negli anni Sessanta con il lavoro pionieristico di William Stokoe sulla American Sign Language (ASL), hanno rivelato che le lingue dei segni sono sistemi linguistici pienamente sviluppati con tutta la complessità strutturale delle lingue parlate. Non sono semplicemente sistemi di gesti iconici o pantomime, ma hanno fonologia (o più propriamente "chirologia" - la struttura delle forme dei segni), morfologia, sintassi, e semantica strutturate sistematicamente.

Proposizioni Relative in ASL

Le proposizioni relative in ASL e altre lingue dei segni sono state studiate estensivamente. Carol Padden, Ursula Bellugi, e altri ricercatori hanno documentato che ASL utilizza costruzioni relative sia tramite giustapposizione che tramite marcatori non-manuali (espressioni facciali, posizione del corpo, direzione dello sguardo) che funzionano analogamente ai pronomi relativi nelle lingue parlate.

In ASL, una proposizione relativa tipicamente è marcata da:

- Innalzamento delle sopracciglia
- Inclinazione della testa leggermente indietro o di lato
- Uno sguardo che può essere diretto verso la localizzazione spaziale associata al referente

Per esempio, per esprimere "Il gatto che il cane inseguì scappò", un segnante potrebbe:

1. Segnare GATTO stabilendo una localizzazione spaziale (diciamo, a destra)
2. Alzare le sopracciglia e inclinare la testa (marcatori di proposizione relativa)
3. Segnare CANE, poi INSEGUIRE con movimento direzionale verso la localizzazione del gatto
4. Abbassare le sopracciglia e ritornare testa a posizione neutra (fine della relativa)
5. Segnare SCAPPARE

L'uso sistematico di marcatori non-manuali per delimitare la proposizione relativa dimostra che questa è genuinamente una costruzione subordinata embedded, non semplicemente una sequenza di frasi indipendenti.

Center-Embedding in Lingue dei Segni

Un aspetto particolarmente interessante riguarda se le lingue dei segni utilizzino center-embedding ricorsivo allo stesso modo delle lingue parlate. Alcuni studi hanno suggerito che le lingue dei segni potrebbero avere una preferenza più forte per strutture right-branching rispetto a center-embedding.

Un motivo potrebbe essere legato alla modalità visiva-gestuale. Nelle lingue parlate, un ascoltatore processa un flusso seriale di informazione acustica temporalmente ordinata e deve mantenere in memoria elementi precedenti mentre processa materiale successivo. Nelle lingue dei segni, la modalità visiva-spaziale permette usi più ricchi dello spazio per codificare relazioni sintattiche, potenzialmente riducendo il carico sulla memoria di lavoro temporale.

Tuttavia, studi più recenti hanno documentato che center-embedding esiste nelle lingue dei segni e può essere prodotto e compreso da segnanti nativi, sebbene come nelle lingue parlate, strutture con embedding molto profondo siano rare e difficili da processare.

Aspetti Unici della Modalità Visiva-Gestuale

La modalità visiva-gestuale permette alcuni fenomeni sintattici che sono difficili o impossibili nelle lingue parlate:

Simultaneità: A differenza del linguaggio parlato, che è inerentemente seriale (possiamo produrre un solo segmento fonico alla volta), il linguaggio dei segni permette la produzione simultanea di molteplici elementi attraverso l'uso di entrambe le mani, espressioni facciali, orientamento del corpo, ecc. Questo permette un grado di "parallelismo" nella struttura sintattica che non ha analogo diretto nelle lingue parlate.

Uso dello Spazio: Le lingue dei segni sfruttano lo spazio tridimensionale davanti al segnante per stabilire e riferirsi a entità del discorso. Localizzazioni spaziali specifiche possono essere associate a referenti, e poi la direzione e endpoint di verbi direzionali indica relazioni grammaticali (chi fa cosa a chi).

Classificatori: Le lingue dei segni utilizzano estensivamente "predicati classificatori" - forme delle mani che rappresentano categorie di oggetti (oggetti veicoli, persone, oggetti piatti, ecc.) e che possono muoversi attraverso lo spazio per rappresentare movimento e disposizione spaziale degli oggetti. Questi permettono descrizioni iconiche e spazialmente accurate che hanno una complessità strutturale che va oltre ciò che è tipicamente espresso nella sintassi delle lingue parlate.

4.3.2 Acquisizione della Ricorsione in Bambini Sordi

L'acquisizione delle strutture ricorsive in bambini sordi che apprendono una lingua dei segni come prima lingua fornisce evidenze importanti sulla natura dello sviluppo ricorsivo.

Studi su bambini sordi nativi (bambini sordi nati da genitori sordi che usano una lingua dei segni) hanno mostrato che il corso dell'acquisizione di strutture ricorsive in lingua dei segni rispecchia strettamente quello osservato per le lingue parlate:

- Le prime forme di subordinazione emergono intorno ai 2-3 anni
- Proposizioni relative semplici appaiono intorno ai 3-4 anni
- Relative sull'oggetto sono acquisite più tardi di relative sul soggetto
- Strutture con embedding multiplo emergono dopo i 4-5 anni

Questo parallelismo suggerisce che i pattern di sviluppo riflettono vincoli cognitivi universali (come limiti di memoria di lavoro e sviluppo di capacità di rappresentazione gerarchica) piuttosto che essere specifici alla modalità acustica del linguaggio.

Un aspetto tragicamente illuminante riguarda i bambini sordi nati da genitori udenti (la vasta maggioranza dei bambini sordi) che non ricevono esposizione precoce a una lingua dei segni. Questi bambini, se non esposti a input linguistico strutturato (segni o parlato con supporto uditivo adeguato) durante i periodi critici dello sviluppo, mostrano deficit linguistici severi e permanenti.

Particolarmente rilevante, molti di questi "late signers" (individui esposti a una lingua dei segni solo dopo l'infanzia) mostrano difficoltà persistenti con strutture sintattiche complesse, incluse costruzioni ricorsive, anche dopo anni di esposizione e uso della lingua dei segni. Questo fornisce evidenza potente per l'esistenza di periodi sensibili nell'acquisizione linguistica e suggerisce che l'esposizione a input linguistico durante i primi anni di vita è cruciale per lo sviluppo normale della capacità ricorsiva.

4.4 Prospettive Filosofiche sulla Ricorsione

La ricorsione linguistica ha implicazioni filosofiche profonde che estendono oltre la linguistica tecnica, toccando questioni fondamentali sulla natura della mente, del significato, della coscienza, e dell'essere umano.

4.4.1 Ricorsione e il Problema del Regresso Infinito

Nella tradizione filosofica, la ricorsione è intimamente connessa al problema del regresso infinito -- la situazione dove una spiegazione di un fenomeno invoca un altro fenomeno dello stesso tipo, che a sua volta richiede spiegazione, conducendo a una catena potenzialmente infinita.

Regresso nelle Definizioni

Consideriamo il problema filosofico della definizione. Se cerchiamo di definire un termine usando altri termini, e poi definiamo quegli altri termini usando ancora altri termini, e così via, dove finiamo? Affrontiamo un regresso infinito, o c'è un punto fondamentale dove ci fermiamo?

Nella semantica linguistica, questo problema si manifesta quando cerchiamo di dare significati alle parole. Se spieghiamo il significato di "cane" dicendo "un mammifero domestico che abbaia", ora dobbiamo spiegare "mammifero", "domestico", e "abbaiare". Se continuiamo questo processo ricorsivamente, potremmo non raggiungere mai un punto fondamentale di significati primitivi non analizzabili.

Diverse soluzioni filosofiche sono state proposte:

Fondazionalismo Semantico: Alcuni filosofi, come Jerry Fodor, hanno proposto che esistono concetti primitivi o "atomi semantici" che non sono ulteriormente analizzabili e che forniscono la base per tutti gli altri significati. Secondo questa visione, la ricorsione nelle definizioni è limitata perché alla fine raggiungiamo primitivi.

Olistico Semantico: Altri filosofi, come Willard Van Orman Quine, hanno argomentato che i significati sono intrinsecamente olistici -- il significato di un termine dipende dalla sua posizione nell'intera rete di termini e credenze. Secondo questa visione, la ricorsione nelle definizioni non è un problema da risolvere ma una caratteristica ineliminabile del linguaggio e del significato.

Grounding Percettivo: Una terza prospettiva, associata al lavoro di filosofi come Stevan Harnad, propone che il regresso definizionale è spezzato attraverso grounding percettivo --

alcuni concetti sono ancorati direttamente all'esperienza sensoriale e percettiva piuttosto che definiti in termini di altri concetti linguistici.

Regresso nella Giustificazione Epistemica

Un regresso parallelo emerge in epistemologia: se la giustificazione per credere una proposizione P viene da un'altra proposizione Q, e la giustificazione per Q viene da R, e così via, affrontiamo un regresso di giustificazioni. Come possiamo avere conoscenza genuinamente giustificata se la catena di giustificazioni è infinita o circolare?

La ricorsione linguistica esacerba questo problema. Se possiamo annidare ricorsivamente proposizioni ("So che tu sai che io so che..."), possiamo generare infinite catene di attributi epistemici. Queste catene riflettono genuini stati epistemici, o sono semplicemente artefatti linguistici?

4.4.2 Wittgenstein e i Limiti della Ricorsione

Il filosofo Ludwig Wittgenstein, nelle sue "Ricerche Filosofiche", presenta argomenti che possono essere interpretati come scettici sulla centralità della ricorsione teorica al linguaggio ordinario.

Giochi Linguistici e Famiglia di Somiglianze

Wittgenstein introduce la nozione di "giochi linguistici" -- le molteplici attività pratiche in cui il linguaggio è incorporato. Egli argomenta che cercare essenze o strutture comuni a tutti gli usi del linguaggio (come una facoltà ricorsiva universale) è fuorviante. Invece, i diversi usi del linguaggio mostrano "somiglianze di famiglia" -- sovrapposizioni parziali piuttosto che un nucleo comune.

Applicato alla ricorsione, un argomento wittgensteiniano potrebbe essere che mentre la ricorsione è una caratteristica di certi usi linguistici (particolarmente in contesti formali, teorici, o letterari), non è necessariamente fondamentale a tutto il linguaggio. Il linguaggio quotidiano conversazionale potrebbe fare scarso uso di ricorsione profonda, affidandosi invece su frasi relativamente semplici connesse pragmaticamente.

Regole e Pratiche

Wittgenstein è scettico dell'idea che seguire regole possa essere completamente analizzato in termini di rappresentazioni mentali esplicite di quelle regole. Questo ha rilevanza per teorie della sintassi ricorsiva che postulano che i parlanti internalizzano regole grammaticali ricorsive.

Secondo un'interpretazione wittgensteiniana, la competenza linguistica non consiste nel rappresentare regole ricorsive ma nel padroneggiare pratiche sociali di uso linguistico. La regolarità che osserviamo (come pattern ricorsivi) emerge da pratiche condivise piuttosto che da regole mentalmente rappresentate.

4.4.3 Ricorsione e Auto-Riferimento

La ricorsione è intimamente connessa all'auto-riferimento -- situazioni dove qualcosa si riferisce a se stesso. L'auto-riferimento è stata una fonte di paradossi famosi in filosofia, logica, e matematica.

Il Paradosso del Mentitore

Il paradosso del mentitore è forse l'esempio più famoso di auto-riferimento paradossale:

"Questa frase è falsa."

Se la frase è vera, allora ciò che afferma è il caso, quindi è falsa. Ma se è falsa, allora ciò che afferma non è il caso, quindi è vera. Raggiungiamo una contraddizione da entrambe le assunzioni.

Il paradosso del mentitore può essere visto come coinvolgente una forma patologica di ricorsione semantica: la frase cerca di specificare le proprie condizioni di verità in un modo che genera un loop infinito.

Versioni sofisticate del paradosso dimostrano che il problema non è semplicemente auto-riferimento diretto. Consideriamo le due frasi:

(1) "La frase (2) è vera" (2) "La frase (1) è falsa"

Queste frasi non sono auto-riferenti direttamente, ma creano un loop ricorsivo che genera contraddizione.

Implicazioni per Teorie del Significato

Il paradosso del mentitore e paradossi correlati hanno implicazioni profonde per teorie formali del significato. Alfred Tarski, nel suo lavoro seminale sulla verità, argomentò che per evitare paradossi, dobbiamo distinguere livelli di linguaggio: un linguaggio-oggetto e un meta-linguaggio. La ricorsione tra questi livelli deve essere controllata per evitare auto-riferimento paradossale.

Saul Kripke, nel suo articolo "Outline of a Theory of Truth", ha sviluppato un approccio alternativo usando semantiche a tre valori (vero, falso, indefinito) e punti fissi, permettendo forme controllate di auto-riferimento e ricorsione nel linguaggio naturale.

4.4.4 Ricorsione e Coscienza

Alcuni filosofi della mente hanno proposto connessioni tra ricorsione linguistica e coscienza o auto-coscienza.

Ricorsione e Coscienza di Ordine Superiore

Teorie di coscienza di ordine superiore (Higher-Order Thought theories), associate a filosofi come David Rosenthal e Peter Carruthers, propongono che uno stato mentale è cosciente se e solo se è l'oggetto di un pensiero di ordine superiore. In altre parole, io sono coscientemente consapevole di vedere rosso solo se ho un pensiero "Io sto vedendo rosso".

Ma questo invita una ricorsione: se lo stato cosciente richiede un pensiero di ordine superiore, quel pensiero di ordine superiore è esso stesso cosciente? Se sì, richiede un pensiero di ordine ancora superiore? E così via, in un regresso infinito.

Diverse soluzioni sono state proposte. Rosenthal argomenta che i pensieri di ordine superiore sono tipicamente non-coscienti -- rendono lo stato di primo ordine cosciente senza essere essi stessi coscienti. Altri teorici hanno proposto forme di auto-rappresentazione ricorsiva che non generano regresso infinito.

Linguaggio Interiore e Pensiero Ricorsivo

La capacità di linguaggio interiore -- il "parlare a se stessi" che molti di noi esperiscono -- potrebbe essere sostanzialmente dipendente dalla capacità ricorsiva del linguaggio. Quando pensiamo in frasi interne, possiamo annidare pensieri ricorsivamente: "Sto pensando che dovrei pensare a cosa penserei se...", creando loops auto-riflessivi.

Alcuni filosofi e psicologi cognitivi, come Andy Clark e Daniel Dennett, hanno proposto che il linguaggio, e particolarmente le sue capacità ricorsive, potrebbe essere costitutivo di certe forme di pensiero di ordine superiore che sono caratteristiche della cognizione umana distintiva.

4.5 Ricorsione, Creatività e Giochi Linguistici

La ricorsione non è solo una proprietà strutturale del linguaggio, ma anche una risorsa per la creatività linguistica. Poeti, scrittori, umoristi, e parlanti ordinari sfruttano le possibilità ricorsive del linguaggio per creare effetti estetici, umoristici, e retorici.

4.5.1 Ricorsione nella Poesia e Letteratura

Strutture Ricorsive come Dispositivi Poetici

I poeti hanno da lungo tempo sfruttato la ricorsione sintattica per creare effetti ritmici, enfatici, o di straniamento. Consideriamo questi versi da "Allegria di naufragi" di Giuseppe Ungaretti:

"E subito riprende il viaggio come dopo il naufragio un superstite lupo di mare"

Anche se questo specifico esempio non mostra annidamento ricorsivo profondo, la struttura comparativa "come dopo il naufragio un superstite lupo di mare" crea un'immagine annidata che richiede al lettore di processare molteplici livelli di similitudine.

Esempi più esplicitamente ricorsivi si trovano in poeti che giocano con subordinazione estesa. Dylan Thomas, nel poema "Fern Hill", crea frasi che si estendono attraverso molteplici versi con subordinazione ricorsiva complessa:

"Now as I was young and easy under the apple boughs About the lilting house and happy as the grass was green, The night above the dingle starry, Time let me hail and climb Golden in the heydays of his eyes..."

La struttura sintattica qui è deliberatamente elaborata e ricorsiva, con subordinate temporali e causali che si annidano, creando un effetto di memoria che scorre e si espande.

Narrativa Meta-Fittiva e Ricorsione

La narrativa meta-fittiva -- storie che riflettono sulla propria natura come storie -- sfrutta intrinsecamente la ricorsione narrativa. Autori come Jorge Luis Borges, Italo Calvino, e Vladimir Nabokov hanno creato opere che contengono livelli multipli di realtà narrativa annidati.

Il racconto di Borges "El jardín de senderos que se bifurcan" (Il giardino dei sentieri che si biforcano) contiene una discussione di un romanzo fittizio che è esso stesso una rete di narrative biforcanti -- ogni punto nella storia genera molteplici possibili continuazioni. Il racconto è una meditazione sulla ricorsione temporale e narrativa.

Calvino, in "Se una notte d'inverno un viaggiatore", crea una struttura dove un lettore cerca di leggere un romanzo ma viene continuamente interrotto, portando a leggere l'inizio di molteplici romanzi diversi annidati all'interno del romanzo-cornice. La struttura è esplicitamente ricorsiva, con livelli multipli di narrazione e lettori.

4.5.2 Giochi di Parole e Umoreismo Ricorsivo

Definizioni Ricorsive Umoristiche

L'umorismo fa frequentemente uso di auto-riferimento e ricorsione paradossale. Consideriamo questa definizione scherzosa:

"Ricorsione: Vedi 'Ricorsione'"

Questo gioca sull'idea di una definizione che si riferisce circolarmente a se stessa, creando un loop infinito se effettivamente seguita.

Variazioni più elaborate giocano con molteplici livelli:

"Per capire la ricorsione, devi prima capire la ricorsione."

Questo crea un prerequisito ricorsivo impossibile da soddisfare, la cui assurdità è la fonte dell'umorismo.

Riddles e Paradossi Linguistici

Molti indovinelli tradizionali sfruttano ambiguità di scoping o strutture ricorsive confuse:

"In una gara, hai superato il secondo classificato. In che posizione sei ora?"

La risposta intuitiva "primo" è errata; sei secondo. L'indovinello sfrutta la tendenza a processare sequenzialmente piuttosto che a computare correttamente la struttura logica ricorsiva.

4.5.3 Metalinguaggio e Ricorsione

Il metalinguaggio -- linguaggio usato per parlare del linguaggio -- è intrinsecamente ricorsivo. Quando discutiamo la grammatica, la semantica, o la pragmatica del linguaggio, usiamo il linguaggio stesso come strumento di analisi.

Menzione vs. Uso

I filosofi distinguono tra usare un'espressione (per riferirsi al suo referente abituale) e menzionarla (per riferirsi all'espressione stessa). Per esempio:

Uso: "Roma è la capitale dell'Italia" Menzione: "'Roma' ha quattro lettere"

Nella prima frase, usiamo "Roma" per riferirci alla città. Nella seconda, menzioniamo "Roma" (indicato dalle virgolette) per riferirci alla parola stessa.

La distinzione menzione-uso crea possibilità ricorsive:

"'Roma' ha quattro lettere" (menzione) "'Roma' ha quattro lettere' è una frase vera" (menzione di una frase che contiene una menzione) ""'Roma' ha quattro lettere' è una frase vera' contiene virgolette" (menzione di menzione di menzione)

E così via, potenzialmente all'infinito.

Paradossi di Auto-Riferimento

Il linguaggio naturale, a differenza dei linguaggi formali gerarchicamente stratificati, permette auto-riferimento libero, che può generare paradossi:

"Questa frase contiene cinque parole." (vera) "Questa frase contiene sette parole." (falsa)
 "Questa frase contiene quattro parole." (paradossale: se vera, allora falsa; se falsa, allora vera)

Questi fenomeni dimostrano che il linguaggio naturale ha capacità ricorsive e auto-referenziali che eccedono quelle che possono essere catturate in sistemi formali completamente consistenti, ricollegandosi ai risultati di incompletezza di Gödel nella logica matematica.

4.6 Ricorsione Interculturale: Universali e Variazioni

Mentre abbiamo discusso la ricorsione come potenzialmente universale al linguaggio umano, è importante esaminare se e come la ricorsione si manifesta attraverso le diverse culture e tradizioni linguistiche del mondo.

4.6.1 Ricorsione in Lingue Isolate e Rare

Lingue Isolate

Le lingue isolate -- lingue senza parenti genetici conosciuti -- forniscono test particolarmente informativi per universali linguistici, poiché le loro strutture sono presumibilmente indipendenti da influenze di contatto o eredità da antenati comuni con altre lingue.

Il Basco, una lingua isolata parlata nei Paesi Baschi tra Spagna e Francia, mostra strutture ricorsive robuste, incluse proposizioni relative complesse e subordinazione multipla. Il Basco ha una sintassi ergativa e strutture morfologiche altamente sintetiche diverse da quelle delle lingue romanze circostanti, ma ciononostante sfrutta pienamente la ricorsione sintattica.

L'Ainu, una lingua isolata parlata storicamente nel nord del Giappone e ora quasi estinta, è stata documentata come avente costruzioni ricorsive, sebbene la documentazione limitata renda difficile un'analisi completa.

Il Burushaski, una lingua isolata parlata in Pakistan settentrionale, ha subordinazione complessa e proposizioni relative che mostrano capacità ricorsive confrontabili a quelle di lingue più ampiamente studiate.

Lingue Papua Nuova Guinea

Papua Nuova Guinea ha la maggiore diversità linguistica del mondo, con oltre 800 lingue parlate in un'area relativamente piccola. Molte di queste lingue sono scarsamente documentate, ma studi su un campione di lingue papuasiane hanno confermato la presenza di strutture ricorsive.

Per esempio, il Kalam, una lingua papuasiana, ha sistemi elaborati di subordinazione e usa costruzioni analoghe alle proposizioni relative, sebbene le strategie morfosintattiche specifiche differiscano significativamente da quelle familiari dalle lingue indoeuropee.

4.6.2 Strategie Alternative per l'Espressione di Relazioni Complesse

Anche quando la ricorsione è disponibile in una lingua, i parlanti potrebbero preferire strategie alternative per esprimere relazioni semantiche complesse, specialmente nel discorso colloquiale quotidiano.

Serializzazione Verbale

Molte lingue, particolarmente in Africa occidentale, Asia sudorientale, e Oceania, fanno uso estensivo di serializzazione verbale -- costruzioni dove molteplici verbi appaiono in sequenza senza marcatori espliciti di subordinazione o coordinazione.

Per esempio, in Yoruba (lingua Niger-Congo parlata in Nigeria):

"Mo mu ìwé wá" io prendere libro venire "Ho portato il libro" (letteralmente: "Presi il libro venni")

Queste costruzioni possono esprimere relazioni complesse tra eventi senza usare subordinazione ricorsiva esplicita. Dibattiti teorici esistono su se serializzazione verbale costituisca una forma di ricorsione implicita o rappresenti un'alternativa strutturale alla ricorsione.

Nominalizzazione e Modificazione

Alcune lingue favoriscono strategie di nominalizzazione dove eventi o proposizioni sono trasformati in nomi che possono poi modificare altri nomi, piuttosto che usare proposizioni relative esplicite.

Per esempio, in Lakhota (lingua Sioux):

"wičháša waŋ wičhínčala waŋ wanŋyánke čhéyaš" uomo un ragazza un vede il "l'uomo che vede una ragazza"

La struttura letterale è più vicina a "uomo ragazza-vedente" con il verbo "vedere" nominalizzato e usato come modificatore.

CONCLUSIONI DEL CAPITOLO 4

Il Capitolo 10 ha esplorato dimensioni avanzate e spesso trascurate della ricorsione linguistica, dalla sua acquisizione nell'infanzia alle sue manifestazioni in patologie linguistiche, dalle sue realizzazioni nelle lingue dei segni alle sue implicazioni filosofiche profonde, dalla sua sfruttamento creativo in letteratura e umorismo alle sue variazioni interculturali.

Diverse tematiche emergono da questa esplorazione:

1. **Universalità e Variabilità:** Mentre la capacità ricorsiva sembra essere universale al linguaggio umano (con la possibile eccezione contestata del Pirahã), le manifestazioni specifiche, le strategie preferite, e l'estensione dell'uso di ricorsione variano considerevolmente attraverso lingue, culture, e individui.
2. **Complessità dello Sviluppo:** L'acquisizione della ricorsione non è un evento discreto ma un processo graduale che si estende su anni, influenzato da fattori maturazionali biologici, limitazioni cognitive in sviluppo, e caratteristiche dell'input linguistico.
3. **Dissociazioni e Modularità:** Evidenze da patologie linguistiche e sindromi genetiche suggeriscono complessi pattern di dissociazione tra capacità ricorsive e altre abilità cognitive e linguistiche, informando dibattiti sulla modularità della mente.
4. **Ricchezza della Modalità:** Le lingue dei segni dimostrano che la ricorsione è indipendente dalla modalità vocale-uditiva, pur mostrando anche come la modalità visivo-gestuale permette strategie sintattiche uniche.
5. **Profondità Filosofica:** La ricorsione tocca questioni filosofiche fondamentali su significato, auto-riferimento, coscienza, e la natura del pensiero umano.
6. **Creatività e Gioco:** La ricorsione non è solo uno strumento strutturale ma una risorsa per creatività linguistica, esplorata e sfruttata in letteratura, umorismo, e giochi linguistici.

La ricorsione emerge come un fenomeno multifaccettato che si situa all'intersezione di biologia, cognizione, cultura, e creatività -- veramente al cuore di ciò che rende il linguaggio umano unico e potente.

APPENDICI TECNICHE: FORMALIZZAZIONI MATEMATICHE

APPENDICE A: TEORIA FORMALE DELLE GRAMMATICHE RICORSIVE

A.1 Definizioni Formali e Notazione

Una grammatica libera dal contesto (Context-Free Grammar, CFG) è formalmente definita come una quadrupla $G = (N, T, P, S)$ dove:

- $N = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ è un insieme finito di simboli non-terminali
- $T = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ è un insieme finito di simboli terminali, con $N \cap T = \emptyset$
- $P \subseteq N \times (N \cup T)^*$ è un insieme finito di regole di produzione
- $S \in N$ è il simbolo iniziale

Una regola di produzione $p \in P$ è tipicamente scritta nella forma $A \rightarrow \alpha$, dove $A \in N$ e $\alpha \in (N \cup T)^*$.

Definizione (Derivazione): Una stringa β deriva direttamente da una stringa α , scritto $\alpha \Rightarrow \beta$, se esistono stringhe $\gamma, \delta \in (N \cup T)^*$, un non-terminale $A \in N$, e una produzione $A \rightarrow \omega \in P$ tali che:

- $\alpha = \gamma A \delta$
- $\beta = \gamma \omega \delta$

La chiusura riflessiva e transitiva di $\Rightarrow$ è denotata da $\Rightarrow^*$, indicando zero o più passi di derivazione.

Definizione (Linguaggio Generato): Il linguaggio generato da una grammatica G , denotato $L(G)$, è:

$$L(G) = \{w \in T^* \mid S \Rightarrow^* w\}$$

Cioè, l'insieme di tutte le stringhe di terminali derivabili dal simbolo iniziale.

A.2 Ricorsione nelle Regole di Produzione

Una grammatica $G = (N, T, P, S)$ è **ricorsiva** se esiste almeno un non-terminale $A \in N$ tale che $A \Rightarrow^+ \alpha A \beta$ per alcune stringhe $\alpha, \beta \in (N \cup T)^*$, dove $\Rightarrow^+$ denota una o più derivazioni.

Definizione (Ricorsione Diretta): Un non-terminale A è **direttamente ricorsivo a sinistra** se esiste una produzione $A \rightarrow A\alpha \in P$ per qualche $\alpha \in (N \cup T)^*$.

Simmetricamente, A è **direttamente ricorsivo a destra** se esiste una produzione $A \rightarrow \alpha A \in P$.

Definizione (Ricorsione Indiretta): Un non-terminale A è **indirettamente ricorsivo** se esistono non-terminali $A_1, A_2, \dots, A_k$ ($k \geq 2$) tali che:

- $A \Rightarrow \alpha_1 A_1 \beta_1$
- $A_1 \Rightarrow \alpha_2 A_2 \beta_2$
- ...
- $A_{k-1} \Rightarrow \alpha_k A \beta_k$

per alcune stringhe $\alpha_i, \beta_i \in (N \cup T)^*$.

Teorema A.1 (Eliminazione della Ricorsione Sinistra): Per ogni CFG G senza ϵ -produzioni e senza cicli (derivazioni della forma $A \Rightarrow^+ A$), esiste una CFG equivalente G' senza ricorsione sinistra.

Dimostrazione (sketch): La costruzione di G' procede in due fasi:

1. **Eliminazione della ricorsione sinistra diretta:** Per ogni non-terminale A con produzioni della forma:
 - $A \rightarrow A\alpha_1 \mid A\alpha_2 \mid \dots \mid A\alpha_k \mid \beta_1 \mid \beta_2 \mid \dots \mid \beta_k$
 dove nessun β_i inizia con A , introduciamo un nuovo non-terminale A' e rimpiazziamo le produzioni con:
 - $A \rightarrow \beta_1 A' \mid \beta_2 A' \mid \dots \mid \beta_k A'$
 - $A' \rightarrow \alpha_1 A' \mid \alpha_2 A' \mid \dots \mid \alpha_k A' \mid \epsilon$
3. **Eliminazione della ricorsione sinistra indiretta:** Ordiniamo i non-terminali $A_1, A_2, \dots, A_k$ ed eliminiamo la ricorsione sinistra seguendo l'ordine, sostituendo A_i nelle produzioni di A_j ($j > i$) fino ad ottenere solo ricorsione sinistra diretta, che poi eliminiamo come sopra. ■

A.3 Profondità di Ricorsione e Complessità Strutturale

Definizione (Profondità di Ricorsione): Dato un albero di derivazione T per una stringa $w \in L(G)$, definiamo la profondità di ricorsione di un non-terminale A in T come:

$\text{depth}_A(T) = \max\{k \mid \exists \text{ un cammino dalla radice a una foglia che attraversa } k \text{ occorrenze di } A\}$

La profondità di ricorsione complessiva di T è:

$\text{depth}(T) = \max\{\text{depth}_A(T) \mid A \in N\}$

Definizione (Linguaggio con Ricorsione Limitata): Un linguaggio L è k -ricorsivo-limitato se esiste una CFG G tale che $L(G) = L$ e per ogni $w \in L$, esiste un albero di derivazione T per w con $\text{depth}(T) \leq k$.

Teorema A.2: Ogni linguaggio regolare è 0-ricorsivo-limitato (può essere generato senza ricorsione).

Dimostrazione: Ogni linguaggio regolare può essere riconosciuto da un automa a stati finiti, e quindi può essere generato da una grammatica regolare (right-linear), che non richiede ricorsione di non-terminali. ■

Teorema A.3: Esistono linguaggi context-free che non sono k -ricorsivo-limitati per alcun k finito.

Dimostrazione (esempio costruttivo): Consideriamo il linguaggio:

$$L = \{a^n b^n \mid n \geq 0\}$$

Questo linguaggio richiede ricorsione arbitraria per essere generato. La grammatica canonica è:

- $S \rightarrow aSb \mid \varepsilon$

Per generare $a^n b^n$, dobbiamo applicare ricorsivamente la prima produzione n volte, quindi la profondità di ricorsione è esattamente n , che è illimitato. ■

A.4 Center-Embedding: Analisi Formale

Definizione (Center-Embedding): Una derivazione in una CFG G esibisce center-embedding se esistono stringhe $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta \in (N \cup T)^*$ e un non-terminale A tale che:

$$S \Rightarrow^* \alpha A \beta \Rightarrow^* \alpha \gamma A \delta \beta \Rightarrow^* \alpha \gamma \varepsilon \zeta \delta \beta$$

dove $\alpha \neq \varepsilon, \beta \neq \varepsilon$ (cioè, il materiale derivato da A è circondato da materiale su entrambi i lati).

Teorema A.4 (Bach, Chomsky): I linguaggi context-free sono chiusi sotto center-embedding limitato ma non sotto center-embedding illimitato in generale.

Definizione (Grado di Center-Embedding): Il grado di center-embedding di una stringa w rispetto a una grammatica G è il massimo numero di applicazioni di produzioni center-embedding necessarie in qualsiasi derivazione di w .

Formalmente, definiamo $\text{ce-depth}(w, G)$ ricorsivamente:

- $\text{ce-depth}(w, G) = 0$ se w può essere derivata senza center-embedding
- $\text{ce-depth}(w, G) = k$ se k è il minimo tale che w può essere derivata con al più k applicazioni annidate di center-embedding

Proposizione A.5: Per il linguaggio $L = \{a^n b^n c^n d^n \mid n \geq 0\}$ (che non è context-free), non esiste una CFG G tale che $L \subseteq L(G)$ con ce-depth limitato.

A.5 Complessità Computazionale del Parsing Ricorsivo

Teorema A.6 (Complessità del CYK): L'algoritmo CYK determina se $w \in L(G)$ per una CFG in Forma Normale di Chomsky in tempo $O(n^3|G|)$ e spazio $O(n^2|N|)$, dove $n = |w|$ e $|G|$ è la dimensione della grammatica.

Dimostrazione (sketch): L'algoritmo costruisce una tabella bidimensionale $\text{chart}[i,j]$ per $1 \leq i \leq j \leq n$, dove $\text{chart}[i,j]$ contiene l'insieme di non-terminali che derivano la sottostringa $w_i \dots w_j$.

- **Spazio:** La tabella ha $O(n^2)$ celle, ciascuna contenente un sottoinsieme di N , quindi spazio totale $O(n^2|N|)$.
- **Tempo:**
 - Inizializzazione (sottostringhe di lunghezza 1): $O(n|G|)$ operazioni
 - Per ogni lunghezza ℓ da 2 a n : $O(n)$ sottostringhe di lunghezza ℓ
 - Per ogni sottostringa: $O(n)$ modi di dividerla in due parti
 - Per ogni divisione: $O(|G|)$ regole da verificare
 - Totale: $O(n \cdot n \cdot n \cdot |G|) = O(n^3|G|)$ ■

Teorema A.7 (Complessità dell'Earley): L'algoritmo di Earley opera in:

- $O(n^3)$ tempo nel caso peggiore (grammatiche ambigue)
- $O(n^2)$ tempo per grammatiche non ambigue
- $O(n)$ tempo per grammatiche LR(k)

dove $n = |w|$.

Corollario A.8: Il riconoscimento di linguaggi context-free (e quindi l'analisi di ricorsione in CFG) è in P (tempo polinomiale).

A.6 Alberi di Derivazione e Struttura Ricorsiva

Definizione (Albero di Derivazione): Un albero di derivazione (parse tree) per una stringa $w \in L(G)$ è un albero ordinato T dove:

1. La radice è etichettata con S
2. Ogni nodo interno è etichettato con un non-terminale $A \in N$
3. Ogni foglia è etichettata con un terminale $a \in T$ o ϵ
4. Se un nodo interno è etichettato A e ha figli etichettati $X_1, X_2, \dots, X_k$ (da sinistra a destra), allora $A \rightarrow X_1X_2\dots X_k \in P$
5. La concatenazione delle etichette delle foglie (da sinistra a destra, omettendo ϵ) è w

Definizione (Altezza di Ricorsione): L'altezza di ricorsione di un albero di derivazione T rispetto a un non-terminale A è:

$$h_A(T) = \max\{\text{lunghezza del cammino da un nodo } A \text{ a un altro nodo } A \text{ in } T\}$$

Proposizione A.9: Per una CFG G e una stringa $w \in L(G)$, se esiste un albero di derivazione T per w con $h_A(T) \geq 2$ per qualche $A \in N$, allora $L(G)$ è infinito.

Dimostrazione (usando Pumping Lemma): L'esistenza di ricorsione $A \Rightarrow^+ \alpha A \beta$ con α o β non-vuoto implica che possiamo "pompare" la derivazione, generando infinite stringhe distinte. ■

APPENDICE B: TEORIA DEI TIPI E LAMBDA CALCOLO

B.1 Lambda Calcolo Tipato: Fondamenti

Il lambda calcolo tipato fornisce le fondamenta formali per la semantica composizionale nella tradizione di Montague. Estendiamo il lambda calcolo non tipato con un sistema di tipi.

Definizione (Tipi Semantici): L'insieme dei tipi T è definito induttivamente:

1. $e \in T$ (tipo delle entità)
2. $t \in T$ (tipo dei valori di verità)
3. Se $\sigma, \tau \in T$, allora $\langle \sigma, \tau \rangle \in T$ (tipo funzionale da σ a τ)

Definizione (Termini Tipati): Per ogni tipo $\tau \in T$, definiamo l'insieme di λ -termini di tipo τ , denotato Term_τ , induttivamente:

1. **Variabili:** Per ogni tipo τ , esiste un insieme numerabile di variabili Var_τ . Se $x \in \text{Var}_\tau$, allora $x \in \text{Term}_\tau$.
2. **Costanti:** Per ogni tipo τ , esiste un insieme di costanti Con_τ . Se $c \in \text{Con}_\tau$, allora $c \in \text{Term}_\tau$.
3. **Applicazione:** Se $M \in \text{Term}_{\langle \sigma, \tau \rangle}$ e $N \in \text{Term}_\sigma$, allora $(M N) \in \text{Term}_\tau$.
4. **Astrazione:** Se $x \in \text{Var}_\sigma$ e $M \in \text{Term}_\tau$, allora $(\lambda x.M) \in \text{Term}_{\langle \sigma, \tau \rangle}$.

Regole di Tipaggio: Formalizziamo le regole di inferenza dei tipi usando giudizi della forma $\Gamma \vdash M : \tau$, che si legge "nel contesto Γ , il termine M ha tipo τ ", dove Γ è un ambiente di tipaggio (mappatura da variabili a tipi).

(Var) $\frac{}{\Gamma \vdash x : \tau}$ se $x:\tau \in \Gamma$

(Con) $\frac{}{\Gamma \vdash c : \tau}$ se $c:\tau \in \text{Con}_\tau$

(App) $\frac{\Gamma \vdash M : \langle \sigma, \tau \rangle \quad \Gamma \vdash N : \sigma}{\Gamma \vdash (M N) : \tau}$

(Abs) $\frac{\Gamma, x:\sigma \vdash M : \tau}{\Gamma \vdash (\lambda x.M) : \langle \sigma, \tau \rangle}$

Teorema B.1 (Unicità dei Tipi): In un dato contesto Γ , ogni termine ben formato ha al più un tipo.

Dimostrazione: Per induzione sulla struttura dei termini, usando l'unicità del tipo nelle regole di inferenza. ■

B.2 Riduzione Beta e Computazione Semantica

Definizione (β -riduzione): Un β -redex è un termine della forma $((\lambda x.M) N)$. Una β -riduzione sostituisce un redex con $M[N/x]$, dove $M[N/x]$ denota la sostituzione di tutte le occorrenze libere di x in M con N (evitando cattura di variabili).

$$((\lambda x.M) N) \rightarrow_{\beta} M[N/x]$$

Definizione (β -equivalenza): Due termini M e N sono β -equivalenti, scritto $M =_{\beta} N$, se possono essere ridotti a una forma comune attraverso una sequenza finita di β -riduzioni e β -espansioni.

Teorema B.2 (Church-Rosser per λ -calcolo tipato): Se $M \rightarrow_{\beta^*} M_1$ e $M \rightarrow_{\beta^*} M_2$, allora esiste N tale che $M_1 \rightarrow_{\beta^*} N$ e $M_2 \rightarrow_{\beta^*} N$.

Conseguenza: La β -equivalenza è decidibile per λ -termini tipati, e ogni termine ha una forma normale unica (se ne ha una).

Teorema B.3 (Normalizzazione Forte): Ogni λ -termine tipato in simply typed lambda calculus è fortemente normalizzante: ogni sequenza di β -riduzioni termina in un numero finito di passi.

Sketch della dimostrazione: Si definisce una misura di complessità sui tipi e termini che decresce strettamente ad ogni β -riduzione. ■

B.3 Interpretazione Semantica e Modelli

Definizione (Modello per λ -calcolo Tipato): Un modello M consiste di:

1. Per ogni tipo di base b , un insieme non-vuoto D_b (il dominio di b)
2. Per ogni tipo funzionale $\langle \sigma, \tau \rangle$, $D_{\langle \sigma, \tau \rangle} = D_{\sigma} \rightarrow D_{\tau}$ (l'insieme di tutte le funzioni da D_{σ} a D_{τ})
3. Un'interpretazione $\llbracket \cdot \rrbracket$ per le costanti: $\llbracket c \rrbracket \in D_{\tau}$ se $c \in \text{Con}_{\tau}$

Definizione (Interpretazione di Termini): Data un'assegnazione di variabili $g: \text{Var} \rightarrow \bigcup_{\tau} D_{\tau}$ (con $g(x) \in D_{\tau}$ se $x \in \text{Var}_{\tau}$), definiamo l'interpretazione $\llbracket M \rrbracket^g$ ricorsivamente:

1. $\llbracket x \rrbracket^g = g(x)$ per $x \in \text{Var}_{\tau}$
2. $\llbracket c \rrbracket^g = \llbracket c \rrbracket$ per $c \in \text{Con}_{\tau}$
3. $\llbracket (M N) \rrbracket^g = \llbracket M \rrbracket^g(\llbracket N \rrbracket^g)$ (applicazione funzionale)
4. $\llbracket (\lambda x.M) \rrbracket^g =$ la funzione $f: D_{\sigma} \rightarrow D_{\tau}$ definita da $f(d) = \llbracket M \rrbracket^{g[x:=d]}$ per ogni $d \in D_{\sigma}$, dove $g[x:=d]$ è l'assegnazione che mappa x a d e coincide con g altrove

Teorema B.4 (Correttezza della β -riduzione): Se $M \rightarrow_{\beta} N$, allora $\llbracket M \rrbracket^g = \llbracket N \rrbracket^g$ per ogni assegnazione g .

Dimostrazione: Basta verificare per un singolo passo di β -riduzione: $\llbracket ((\lambda x.M) N) \rrbracket^g = \llbracket \lambda x.M \rrbracket^g(\llbracket N \rrbracket^g) = \llbracket M \rrbracket^{g[x:=\llbracket N \rrbracket^g\rrbracket]} = \llbracket M[N/x] \rrbracket^g$

dove l'ultima uguaglianza segue dal lemma di sostituzione. ■

B.4 Semantica Intensionale e Mondi Possibili

Per gestire intensionalità (verbi di atteggiamento proposizionale, operatori modali), estendiamo il sistema di tipi.

Definizione (Tipi Intensionali): Aggiungiamo un nuovo tipo di base s (tipo degli indici – mondi possibili, tempi, o coppie mondo-tempo).

L'intensione di un tipo τ è il tipo funzionale $\langle s, \tau \rangle$. Per esempio:

- L'intensione di un valore di verità (tipo t) è tipo $\langle s, t \rangle$ (una proposizione)
- L'intensione di un'entità (tipo e) è tipo $\langle s, e \rangle$ (un concetto individuale)

Operatori Intensionali:

- **Intension ($\wedge$):** Se α ha tipo τ , allora $\wedge \alpha$ ha tipo $\langle s, \tau \rangle$ $\llbracket \wedge \alpha \rrbracket^{\{g, w\}} = \lambda w'. \llbracket \alpha \rrbracket^{\{g, w'\}}$
- **Extension ($\vee$):** Se α ha tipo $\langle s, \tau \rangle$, allora $\vee \alpha$ ha tipo τ $\llbracket \vee \alpha \rrbracket^{\{g, w\}} = \llbracket \alpha \rrbracket^{\{g, w\}}(w)$

Interpretazione di Verbi di Atteggiamento:

$\llbracket \text{credere} \rrbracket : \langle e, \langle \langle s, t \rangle, t \rangle \rangle$

$\llbracket \text{credere} \rrbracket(x)(p) = 1$ sse per ogni mondo w' accessibile dalle credenze di x in w , $p(w') = 1$

Formalmente: $\llbracket \text{credere} \rrbracket(x)(p) = 1$ sse $\forall w' \in \text{Dox}_x(w) : p(w') = 1$

dove $\text{Dox}_x(w)$ è l'insieme di mondi compatibili con le credenze di x in w (mondi doxasticamente accessibili).

B.5 Quantificazione e Ambiguità di Scope

Trattamento Montague dei Quantificatori:

I quantificatori sono trattati come denotanti oggetti di tipo $\langle \langle e, t \rangle, t \rangle$ – funzioni da proprietà (tipo $\langle e, t \rangle$) a valori di verità.

$\llbracket \text{ogni} \rrbracket = \lambda P. \lambda Q. \forall x [P(x) \rightarrow Q(x)]$ $\llbracket \text{qualche} \rrbracket = \lambda P. \lambda Q. \exists x [P(x) \wedge Q(x)]$ $\llbracket \text{nessuno} \rrbracket = \lambda P. \lambda Q. \neg \exists x [P(x) \wedge Q(x)]$

Quantifier Raising (QR): Per gestire ambiguità di scope, postuliamo un livello di Forma Logica (LF) dove i quantificatori sono mossi a posizioni di scope, lasciando tracce indicizzate.

Sintassi superficiale: [Ogni studente]₁ lesse [qualche libro]₂

LF1 (scope superficie): [Ogni studente]₁ [qualche libro]₂ [_{t₁} lesse _{t₂}] LF2 (scope inverso): [Qualche libro]₂ [ogni studente]₁ [_{t₁} lesse _{t₂}]

Regola di Interpretazione per QR:

Se α è $[QP_i \dots t_i \dots]$, dove QP è un sintagma quantificazionale e t_i è la sua traccia, allora:

$$[[\alpha]]^g = [[QP]]^g(\lambda x. [[\dots t_i \dots]]^g\{g[i:=x]\})$$

Esempio di Derivazione Completa:

Frase: "Ogni studente lesse qualche libro" LF: $[Ogni\ studente]_1 [[qualche\ libro]_2 [t_1\ lesse\ t_2]]$

$$\begin{aligned} [[LF]] &= [[ogni\ studente]](\lambda x. [[qualche\ libro]_2 [t_1\ lesse\ t_2]]^g\{g[1:=x]\}) = \lambda P. \lambda Q. \forall y [Studente(y) \rightarrow \\ &\rightarrow Q(y)](\lambda x. [[qualche\ libro]_2 [t_1\ lesse\ t_2]]^g\{g[1:=x]\}) = \lambda Q. \forall y [Studente(y) \rightarrow \\ &Q(y)](\lambda x. [[qualche\ libro]_2 [t_1\ lesse\ t_2]]^g\{g[1:=x]\}) = \forall y [Studente(y) \rightarrow [[qualche\ libro]_2 [t_1\ \\ &lesse\ t_2]]^g\{g[1:=y]\}] = \forall y [Studente(y) \rightarrow [[qualche\ libro]](\lambda z. [[t_1\ lesse\ t_2]]^g\{g[1:=y, 2:=z]\})] = \\ &\forall y [Studente(y) \rightarrow \exists z [Libro(z) \wedge Lesse(y, z)]] \end{aligned}$$

APPENDICE C: AUTOMI E LINGUAGGI FORMALI

C.1 Gerarchia di Chomsky e Potere Espressivo

Teorema C.1 (Gerarchia di Chomsky): Esistono contenimenti stretti tra le classi di linguaggi:

$$REG \subset CFL \subset CSL \subset RE$$

dove:

- REG = linguaggi regolari (riconosciuti da automi a stati finiti)
- CFL = linguaggi context-free (riconosciuti da automi a pila)
- CSL = linguaggi context-sensitive (riconosciuti da automi linearmente limitati)
- RE = linguaggi ricorsivamente enumerabili (riconosciuti da macchine di Turing)

Dimostrazione del contenimento stretto $REG \subset CFL$:

($\subseteq$) Ogni linguaggio regolare può essere generato da una grammatica right-linear, che è un caso speciale di CFG.

($\neq$) Il linguaggio $L = \{a^n b^n \mid n \geq 0\}$ è context-free (generato da $S \rightarrow aSb \mid \epsilon$) ma non regolare.

Dimostrazione (Pumping Lemma per linguaggi regolari): Supponiamo per contraddizione che L sia regolare. Allora esiste p (pumping length) tale che ogni stringa $w \in L$ con $|w| \geq p$ può essere decomposta come $w = xyz$ con:

1. $|xy| \leq p$
2. $|y| > 0$
3. $xy^i z \in L$ per ogni $i \geq 0$

Consideriamo $w = a^p b^p \in L$. Per (1) e (2), y consiste solo di a 's. Ma allora $xy^2z = a^{p+|y|} b^p \notin L$, contraddizione. ■

Teorema C.2 (Pumping Lemma per CFL): Se L è context-free, allora esiste p tale che ogni stringa $w \in L$ con $|w| \geq p$ può essere decomposta come $w = uvxyz$ con:

1. $|vxy| \leq p$
2. $|vy| > 0$
3. $uv^ixy^iz \in L$ per ogni $i \geq 0$

Applicazione: Il linguaggio $L = \{a^n b^n c^n \mid n \geq 0\}$ non è context-free.

Dimostrazione: Supponiamo L sia context-free con pumping length p . Consideriamo $w = a^p b^p c^p$. Per il pumping lemma, $w = uvxyz$ con $|vxy| \leq p$ e $|vy| > 0$.

Caso 1: vxy contiene solo un tipo di simbolo (solo a 's, o solo b 's, o solo c 's). Allora pompando (uv^2xy^2z) aumentiamo il numero di quel simbolo ma non degli altri, violando il requisito $a^n b^n c^n$.

Caso 2: vxy contiene due tipi di simboli. Sottocaso 2a: vxy contiene a 's e b 's (ma non c 's). Allora v o y contiene a 's o b 's (o entrambi). Pompando, aumentiamo a 's e/o b 's ma non c 's.

Sottocaso 2b: vxy contiene b 's e c 's (ma non a 's). Simile al 2a.

In tutti i casi, raggiungiamo contraddizione. ■

C.2 Automi a Pila e Riconoscimento di Ricorsione

Definizione (Automa a Pila Deterministico - DPDA): Un DPDA è una settupla $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, Z_0, F)$ dove:

- Q è un insieme finito di stati
- Σ è l'alfabeto di input
- Γ è l'alfabeto dello stack
- $\delta: Q \times (\Sigma \cup \{\epsilon\}) \times \Gamma \rightarrow P(Q \times \Gamma^*)$ è la funzione di transizione
- $q_0 \in Q$ è lo stato iniziale
- $Z_0 \in \Gamma$ è il simbolo iniziale dello stack
- $F \subseteq Q$ è l'insieme di stati finali

Configurazione: Una configurazione è una tripla $(q, w, \gamma) \in Q \times \Sigma^* \times \Gamma^*$ rappresentante lo stato corrente, input rimanente, e contenuto dello stack.

Transizione: $(q, aw, Z\alpha) \vdash (q', w, \beta\alpha)$ se $(q', \beta) \in \delta(q, a, Z)$

Teorema C.3: Un linguaggio è context-free se e solo se è riconosciuto da qualche automa a pila (possibilmente non-deterministico).

Esempio (Riconoscimento di $\{a^n b^n\}$): Definiamo un DPDA che:

1. Pusha Z per ogni a letta
2. Poppa Z per ogni b letta
3. Accetta se lo stack è vuoto alla fine dell'input

Formalmente: $M = (\{q_0, q_1, q_2\}, \{a, b\}, \{Z, Z_0\}, \delta, q_0, Z_0, \{q_2\})$

$\delta(q_0, a, Z_0) = \{(q_0, ZZ_0)\}$ $\delta(q_0, a, Z) = \{(q_0, ZZ)\}$ $\delta(q_0, b, Z) = \{(q_1, \epsilon)\}$ $\delta(q_1, b, Z) = \{(q_1, \epsilon)\}$ $\delta(q_1, \epsilon, Z_0) = \{(q_2, Z_0)\}$

C.3 Complessità Descrittiva e Ricorsione

Definizione (Complessità di Kolmogorov): La complessità di Kolmogorov $K(x)$ di una stringa x è la lunghezza del programma più corto (in un linguaggio di programmazione universal fissato) che produce x come output.

Proposizione C.4: Linguaggi altamente ricorsivi tendono ad avere bassa complessità di Kolmogorov: strutture ricorsive possono essere descritte compattamente.

Esempio: La stringa $x = a^n b^n$ per n grande ha $K(x) \approx \log(n)$, poiché possiamo descriverla con "stampa a per n volte, poi b per n volte" dove n è codificato in $O(\log n)$ bit.

Al contrario, una stringa casuale y di lunghezza $2n$ ha $K(y) \approx 2n$ (incomprimibile).

APPENDICE D: COMPLESSITÀ COGNITIVA E MODELLI COMPUTAZIONALI

D.1 Memoria di Lavoro e Vincoli sul Center-Embedding

Modello di Gibson (Dependency Locality Theory):

Il costo di integrazione di una dipendenza sintattica è proporzionale a:

1. Distanza lineare (numero di parole) tra dependent e head
2. Numero di nuovi referenti discorsivi introdotti nell'intervallo

Formalmente, per una dipendenza tra posizioni i e j ($j > i$) in una frase:

$\text{Cost}(i, j) = \alpha \cdot (j - i) + \beta \cdot |\{k \mid i < k < j \text{ e } w_k \text{ introduce nuovo referente}\}|$

dove α, β sono parametri da stimare empiricamente.

Predizione per Center-Embedding: Il center-embedding ha costo quadratico nella profondità:

- 1 livello: costo $O(n)$
- 2 livelli: costo $O(n^2)$
- k livelli: costo $O(n^k)$

Teorema D.1 (Limite di Memoria): Se la memoria di lavoro ha capacità fissa M , allora la profondità massima k di center-embedding processabile soddisfa:

$$k \leq \sqrt[3]{2M} - 1$$

Dimostrazione: Il numero totale di dipendenze aperte al punto di massima nidificazione è: $k + (k-1) + \dots + 1 = k(k+1)/2 \leq M$

Risolvendo per k : $k^2 + k - 2M \leq 0$, quindi $k \leq (-1 + \sqrt{1 + 8M})/2 \approx \sqrt{2M} - 1$. ■

D.2 Analisi Sintattica Probabilistica

Definizione (PCFG): Una PCFG è una CFG dove ogni produzione $A \rightarrow \beta$ ha associata una probabilità $P(A \rightarrow \beta)$ tale che:

$$\sum_{\beta : A \rightarrow \beta \in P} P(A \rightarrow \beta) = 1 \text{ per ogni } A \in N$$

Probabilità di un Albero di Derivazione:

$$P(T) = \prod_{(A \rightarrow \beta) \text{ usata in } T} P(A \rightarrow \beta)$$

Problema di Parsing Ottimale: Dato $w \in \Sigma^*$, trovare:

$$T^* = \operatorname{argmax}_{\{T : \text{yield}(T)=w\}} P(T)$$

Algoritmo di Viterbi per PCFG (estensione di CYK):

$\text{chart}[i,j,A] = \max$ probabilità che A derivi $w_i \dots w_j$

Base: $\text{chart}[i,i,A] = P(A \rightarrow w_i)$ se $A \rightarrow w_i \in P$, altrimenti 0

Ricorsione:

$$\text{chart}[i,j,A] = \max_{k \in [i,j-1]} \max_{\{A \rightarrow BC \in P\}} P(A \rightarrow BC) \cdot \text{chart}[i,k,B] \cdot \text{chart}[k+1,j,C]$$

Complessità: $O(n^3|G|)$ come CYK standard.

D.3 Misure di Complessità Sintattica

Definizione (Yngve Depth): La profondità di Yngve di un nodo in un albero sintattico è il numero di nodi fratelli a destra che dominano materiale lessicale.

Definizione (Frazier's Complexity Metric): Il costo di processamento è proporzionale al numero di nodi nella derivazione (hypothesis: minimal attachment).

Proposizione D.2: Per strutture con center-embedding di profondità k , le misure di complessità crescono almeno linearmente in k , e molte crescono quadraticamente.

APPENDICE E: RICORSIONE E TEORIA DELL'INFORMAZIONE

E.1 Entropia di Strutture Ricorsive

Definizione (Entropia di Shannon): Per una distribuzione di probabilità P su stringhe:

$$H(P) = -\sum_{\{w\}} P(w) \log_2 P(w)$$

Teorema E.1: Grammatiche ricorsive possono generare distribuzioni con entropia arbitrariamente alta (linguaggi infiniti).

Cross-Entropy tra Modelli: Date due distribuzioni P (vera) e Q (stimata):

$$H(P, Q) = -\sum \{w\} P(w) \log_2 Q(w)$$

Misura quanto Q stima bene P . Minimizzare cross-entropy è equivalente a massimizzare likelihood.

E.2 Perplexity e Modelli Ricorsivi

Definizione (Perplexity):

$$PP(P) = 2^{H(P)}$$

Misura il "branching factor" medio del linguaggio.

Teorema E.2: Per modelli ricorsivi come PCFG, la perplexity può essere calcolata ricorsivamente dalle probabilità di produzione.

F.1 Teorema di Caratterizzazione delle Grammatiche Regolari

Teorema F.1 (Equivalenza tra Grammatiche Regolari e Automi a Stati Finiti): Un linguaggio L è regolare se e solo se esiste un automa a stati finiti (FSA) che lo riconosce.

Dimostrazione ($\Rightarrow$): Supponiamo $L = L(G)$ per qualche grammatica regolare $G = (N, T, P, S)$.

Costruiamo un FSA $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ come segue:

- $Q = N \cup \{q_f\}$ dove q_f è uno stato finale aggiunto
- $\Sigma = T$
- $q_0 = S$
- $F = \{q_f\} \cup \{A \in N \mid A \rightarrow \varepsilon \in P\}$

Funzione di transizione δ :

- Se $A \rightarrow aB \in P$, allora $\delta(A, a) = B$
- Se $A \rightarrow a \in P$, allora $\delta(A, a) = q_f$

Passo induttivo: Dimostriamo per induzione sulla lunghezza della derivazione che se $S \Rightarrow^* w$ allora M accetta w .

Base ($|w| = 0$): Se $S \rightarrow \varepsilon \in P$, allora $S \in F$ e M accetta ε .

Passo induttivo: Supponiamo vero per stringhe di lunghezza $\leq k$. Sia $w = av$ con $|w| = k+1$. Se $S \Rightarrow^* w$, allora esiste una derivazione $S \Rightarrow aA \Rightarrow^* w$ per qualche $A \in N$. Per ipotesi induttiva, M transita da A a uno stato accettante leggendo v . Poiché $\delta(S, a) = A$, M accetta w .

Dimostrazione ($\Leftarrow$): Dato FSA $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$, costruiamo grammatica $G = (N, T, P, S)$:

- $N = Q$
- $T = \Sigma$
- $S = q_0$
- P contiene:
 - $q \rightarrow a \cdot \delta(q, a)$ per ogni $q \in Q, a \in \Sigma$ con $\delta(q, a)$ definito
 - $q \rightarrow \epsilon$ per ogni $q \in F$

La dimostrazione che $L(M) = L(G)$ segue per costruzione. ■

F.2 Pumping Lemma - Dimostrazione Costruttiva Completa

Teorema F.2 (Pumping Lemma per Linguaggi Regolari): Se L è regolare, allora esiste $p \in \mathbb{N}$ (pumping length) tale che per ogni $w \in L$ con $|w| \geq p$, esistono stringhe x, y, z soddisfacenti:

1. $w = xyz$
2. $|xy| \leq p$
3. $|y| > 0$
4. $\forall i \geq 0: xy^i z \in L$

Dimostrazione: Sia $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ un FSA che riconosce L . Poniamo $p = |Q|$.

Sia $w \in L$ con $|w| = n \geq p$. Scriviamo $w = a_1 a_2 \dots a_n$.

Consideriamo la sequenza di stati visitati durante l'accettazione: $q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$ dove $q_i = \delta^*(q_0, a_1 \dots a_i)$

Nei primi $p+1$ stati ($q_0, q_1, \dots, q_p$), per il principio dei cassetti (pigeonhole principle), poiché $\{q_0, \dots, q_p\} = p+1 > |Q| = p$, esistono indici $0 \leq i < j \leq p$ tali che $q_i = q_j$.

Definiamo:

- $x = a_1 \dots a_i$ (porzione prima del loop)
- $y = a_{i+1} \dots a_j$ (porzione del loop)
- $z = a_{j+1} \dots a_n$ (porzione dopo il loop)

Verifichiamo le proprietà:

1. **$w = xyz$:** Per costruzione, $x \cdot y \cdot z = a_1 \dots a_i \cdot a_{i+1} \dots a_j \cdot a_{j+1} \dots a_n = w$ ✓
2. **$|xy| \leq p$:** Poiché $j \leq p$, abbiamo $|xy| = j \leq p$ ✓
3. **$|y| > 0$:** Poiché $i < j$, abbiamo $|y| = j - i > 0$ ✓
4. **$\forall i \geq 0: xy^i z \in L$:**
 - Per $i = 0$: xz rappresenta il cammino $q_0 \xrightarrow{x} q_i \xrightarrow{z} q_n \in F$
 - Per $i = 1$: $xyz = w \in L$ per ipotesi

- Per $i > 1$: $xy^i z$ rappresenta il cammino che percorre il loop i volte: $q_0 \xrightarrow{x} q_i \xrightarrow{y} q_i (=q_i) \xrightarrow{y} q_i \rightarrow \dots \rightarrow q_i \xrightarrow{z} q_i \in F$
- 5. Poiché $q_i = q_i$, possiamo ripetere il loop arbitrariamente e raggiungere sempre $q_i \in F$. ■

F.3 Linguaggi Context-Free - Forma Normale di Chomsky

Definizione (Forma Normale di Chomsky - CNF): Una CFG G è in CNF se ogni produzione è nella forma:

- $A \rightarrow BC$ dove $B, C \in N$ (non-terminali)
- $A \rightarrow a$ dove $a \in T$ (terminale)
- $S \rightarrow \varepsilon$ (solo se $\varepsilon \in L(G)$)

Teorema F.3 (Esistenza di CNF): Per ogni CFG G , esiste una CFG equivalente G' in CNF tale che $L(G) = L(G')$.

Dimostrazione (Algoritmo Costruttivo):

Passo 1 - Eliminazione di ε -produzioni (eccetto $S \rightarrow \varepsilon$ se necessario):

Per ogni non-terminale A tale che $A \Rightarrow^* \varepsilon$, identifichiamo A come "nullable".

Algoritmo di identificazione nullable:

Nullable = $\{A \mid A \rightarrow \varepsilon \in P\}$

repeat:

for each production $A \rightarrow X_1 X_2 \dots X_n \in P$:

if $X_1, X_2, \dots, X_n \in \text{Nullable}$:

Nullable = Nullable $\cup \{A\}$

until no change in Nullable

Per ogni produzione $A \rightarrow X_1 X_2 \dots X_n$ dove alcuni X_i sono nullable, aggiungiamo tutte le versioni con subset di nullable omessi.

Esempio: Se $A \rightarrow BCD$ con B, C nullable, aggiungiamo:

- $A \rightarrow BCD$ (originale)
- $A \rightarrow CD$ (B omesso)
- $A \rightarrow BD$ (C omesso)
- $A \rightarrow D$ (B, C omessi)

Passo 2 - Eliminazione di produzioni unitarie ($A \rightarrow B$):

Costruiamo la chiusura transitiva delle relazioni unitarie: $\text{Unit}(A) = \{B \mid A \Rightarrow^* B \text{ usando solo produzioni unitarie}\}$

Per ogni A e ogni $B \in \text{Unit}(A)$, se $B \rightarrow \alpha$ è una produzione non-unitaria, aggiungiamo $A \rightarrow \alpha$.

Poi rimuoviamo tutte le produzioni unitarie.

Passo 3 - Conversione in CNF:

Per ogni produzione $A \rightarrow X_1 X_2 \dots X_k$ con $k \geq 3$:

Rimpiazziamo con:

- $A \rightarrow X_1 A_1$
- $A_1 \rightarrow X_2 A_2$
- ...
- $A_{k-2} \rightarrow X_{k-1} X_k$

dove $A_1, A_2, \dots, A_{k-2}$ sono nuovi non-terminali.

Per ogni produzione $A \rightarrow X_1 X_2$ dove X_1 o X_2 è un terminale a :

Introduciamo nuovo non-terminale A_a e produzione $A_a \rightarrow a$. Rimpiazziamo occorrenze di a con A_a in $A \rightarrow X_1 X_2$.

Correttezza: Ogni passo preserva il linguaggio generato (dimostrazione per casi). ■

F.4 Pumping Lemma per Context-Free Languages

Teorema F.4 (Pumping Lemma per CFL): Se L è context-free, esiste $p \in \mathbb{N}$ tale che per ogni $w \in L$ con $|w| \geq p$, esistono u, v, x, y, z soddisfacenti:

1. $w = uvxyz$
2. $|vxy| \leq p$
3. $|vy| > 0$
4. $\forall i \geq 0: uv^i xy^i z \in L$

Dimostrazione: Sia G in CNF che genera L , con $|N| = m$ non-terminali.

Osservazione chiave: In CNF, ogni albero di derivazione è binario. Un albero binario di altezza h ha al massimo 2^h foglie.

Poniamo $p = 2^{m+1}$.

Sia $w \in L$ con $|w| = n \geq p$. Consideriamo un albero di derivazione T per w con numero minimo di nodi.

Claim: L'altezza h di T soddisfa $h > m$.

Dimostrazione del claim: Se $h \leq m$, allora T ha al massimo $2^h \leq 2^m < 2^{(m+1)} = p$ foglie. Ma w ha $n \geq p$ caratteri, quindi $|w| >$ numero di foglie, contraddizione. ■

Poiché $h > m$, esiste un cammino dalla radice a una foglia con lunghezza $> m$.

In questo cammino, ci sono $> m+1$ nodi interni, quindi $> m$ non-terminali.

Per pigeonhole, qualche non-terminale A appare almeno due volte.

Sia A l'ultima ripetizione (più vicina alla foglia). Struttura:

S

↓

...

↓

A (occorrenza superiore)

/\

v A y (occorrenza inferiore)

|

x

Definiamo:

- $S \Rightarrow^* uAz$ (parte sopra A superiore)
- $A \Rightarrow^* vAy$ (parte tra le due A)
- $A \Rightarrow^* x$ (parte sotto A inferiore)

Allora $w = uvxyz$.

Verifica proprietà:

1. **$w = uvxyz$:** Per costruzione ✓
2. **$|vxy| \leq p$:** Il sottoalbero radicato nella A superiore ha altezza $\leq m+1$ (altrimenti avremmo scelto A più in alto). Quindi ha al massimo $2^{(m+1)} = p$ foglie. ✓
3. **$|vy| > 0$:** Se $v = y = \epsilon$, allora la derivazione $A \Rightarrow^* vAy = A$ sarebbe ciclica senza progresso, contraddicendo minimalità dell'albero. ✓
4. **$\forall i \geq 0: uv^i xy^i z \in L$:**

- $i = 0$: $S \Rightarrow^* uAz \Rightarrow^* uxz$ usando $A \Rightarrow^* x$
 - $i = 1$: w per costruzione
 - $i > 1$: $S \Rightarrow^* uAz \Rightarrow^* uvAyz \Rightarrow^* uv^2Ay^2z \Rightarrow^* \dots \Rightarrow^* uv^i Ay^i z \Rightarrow^* uv^i xy^i z$
5. Ripetendo la derivazione $A \Rightarrow^* vAy$ i volte prima di applicare $A \Rightarrow^* x$. ✓ **I**

F.5 Linguaggi Context-Sensitive e Automi Linearmente Limitati

Definizione (Context-Sensitive Grammar - CSG): Una CSG ha produzioni nella forma $\alpha A \beta \rightarrow \alpha \gamma \beta$ dove:

- $A \in N$
- $\alpha, \beta \in (N \cup T)^*$
- $\gamma \in (N \cup T)^+$
- $|\gamma| \geq 1$ (non-contracting)

Definizione (Automa Linearmente Limitato - LBA): Un LBA è una macchina di Turing non-deterministica con le seguenti restrizioni:

- Il nastro è limitato alla dimensione dell'input
- La testina non può uscire dai confini dell'input

Teorema F.5 (Equivalenza CSG $\leftrightarrow$ LBA): Un linguaggio è context-sensitive se e solo se è accettato da qualche LBA.

Dimostrazione (sketch, $\Rightarrow$):

Dato $L = L(G)$ per CSG G , costruiamo LBA M che:

1. Copia input w sul nastro
2. Non-deterministicamente applica produzioni di G al contrario (da derivazione a S)
3. Accetta se raggiunge S

Poiché G è non-contracting, ogni passo della derivazione inversa non aumenta la lunghezza. Quindi M opera in spazio $O(|w|)$.

Dimostrazione ($\Leftarrow$):

Dato LBA M , costruiamo CSG G che simula computazioni di M .

Non-terminali di G codificano configurazioni di M :

- Stato corrente di M
- Contenuto del nastro
- Posizione della testina

Produzioni simulano transizioni di M .

Dettagli tecnici omissi per brevità (vedi Hopcroft & Ullman 1979). **I**

SEZIONE G: TEORIA DEI GRAFI APPLICATA ALLA SINTASSI

G.1 Grafi di Dipendenza Sintattica

Definizione (Grafo di Dipendenza): Un grafo di dipendenza per una frase $w = w_1 w_2 \dots w_n$ è un grafo diretto $G = (V, E)$ dove:

- $V = \{w_1, w_2, \dots, w_n, \text{ROOT}\}$
- $E \subseteq V \times V$ con $(w_i, w_j) \in E$ se w_i è head di w_j
- ROOT ha out-degree 1 (verso la parola principale)
- Ogni w_i ha in-degree esattamente 1 (single-head constraint)
- G è un albero (acyclico, connesso)

Teorema G.1 (Proiettività): Un grafo di dipendenza G è proiettivo se e solo se per ogni arco (w_i, w_j) con $i < j$, e per ogni k tale che $i < k < j$, w_j è discendente di w_i in G .

Equivalentemente: gli archi non si "incrociano" quando si disegna il grafo sopra la frase linearizzata.

Dimostrazione: ($\Rightarrow$) Supponiamo G proiettivo. Sia (w_i, w_j) un arco con $i < k < j$.

Per proiettività, esiste un cammino $w_i \rightarrow \dots \rightarrow w_j$ in G . Quindi w_j è discendente di w_i . ✓

($\Leftarrow$) Supponiamo nessun arco si incroci. Mostriamo che G è proiettivo.

Consideriamo (w_i, w_j) e k con $i < k < j$. Se w_j non fosse discendente di w_i , avrebbe un head w_ℓ con $\ell < i$ o $\ell > j$. Ma allora (w_ℓ, w_j) incrocia (w_i, w_j) , contraddizione. ■

G.2 Complessità di Parsing per Grafi di Dipendenza

Teorema G.2 (Complessità di Parsing Proiettivo): Dato un insieme di dipendenze proiettive, il problema di trovare il grafo di dipendenza valido di costo minimo è risolubile in tempo $O(n^3)$.

Algoritmo (CKY per Dipendenze):

Sia $\text{score}(i, j, d)$ il costo dell'arco da w_i a w_j in direzione $d \in \{\rightarrow, \leftarrow\}$.

Definiamo $\text{chart}[i, j, h] =$ costo minimo dell'albero di dipendenza coprente $w_i \dots w_j$ con head $h \in \{i, \dots, j\}$.

Base: $\text{chart}[i, i, i] = 0$

Ricorsione:

$\text{chart}[i, j, h] = \min \text{ over split } k \in [i, j-1]:$

$\text{chart}[i, k, h] + \text{chart}[k+1, j, h'] + \text{score}(h, h', \text{direction})$

per tutte le combinazioni valide di h , h' , direction

Complessità: $O(n)$ intervalli $\times O(n)$ split $\times O(n^2)$ combinazioni head = $O(n^4)$

Con ottimizzazioni (Eisner 1996): $O(n^3)$ ■

G.3 Distanza di Dipendenza e Complessità Cognitiva

Definizione (Distanza di Dipendenza): Per un arco (w_i, w_j) , la distanza è $|i - j|$.

Per un grafo G , la distanza totale è: $DD(G) = \sum_{(w_i, w_j) \in E} |i - j|$

Teorema G.3 (Dependency Locality Theory - Gibson 2000): Il costo di processamento di una frase è proporzionale alla distanza totale delle dipendenze più il numero di nuovi referenti discorsivi introdotti.

Formalmente: $Cost(w) = \alpha \cdot DD(G) + \beta \cdot NewReferents(w)$

dove α , β sono parametri stimati empiricamente.

Predizione per Center-Embedding:

Per una struttura con k livelli di center-embedding, ciascuno introducendo n parole:

$$DD(G) = O(k \cdot n + (k-1) \cdot 2n + (k-2) \cdot 3n + \dots + 1 \cdot kn) = O(n \cdot (k + 2(k-1) + 3(k-2) + \dots + k \cdot 1)) = O(n \cdot k^2)$$

Quindi il costo cresce quadraticamente nella profondità k .

H.1 Fondamenti della Complessità di Kolmogorov

Definizione (Complessità di Kolmogorov): Sia U una macchina di Turing universale. La complessità di Kolmogorov di una stringa x è:

$$K(x) = \min\{|p| : U(p) = x\}$$

dove p varia su tutti i programmi che producono x come output.

Teorema H.1 (Invarianza): Per ogni due macchine universali U_1 , U_2 :

$$K_{U_1}(x) \leq K_{U_2}(x) + c$$

dove c è una costante dipendente solo da U_1 , U_2 (non da x).

Dimostrazione: Esiste un programma interprete I di lunghezza fissa $|I| = c$ tale che $U_1(I \cdot p)$ simula $U_2(p)$.

Quindi se $U_2(p) = x$ con $|p| = K_{U_2}(x)$, allora $U_1(I \cdot p) = x$ con $|I \cdot p| = c + K_{U_2}(x)$.

Per minimalità di $K_{\{U_1\}}(x)$: $K_{\{U_1\}}(x) \leq |l \cdot p| = c + K_{\{U_2\}}(x)$ ■

Conseguenza: $K(x)$ è definita a meno di una costante additiva, quindi scriviamo semplicemente $K(x)$.

H.2 Ricorsione e Comprimità

Proposizione H.2 (Strutture Ricorsive sono Comprimiti): Sia $x = f(n)$ dove f è una funzione ricorsiva primitiva computabile in tempo $t(n)$.

Allora: $K(x) = O(\log n + \log t(n))$

Dimostrazione: Un programma per generare x può essere:

Codifica di f : $O(1)$ bit (fisso)

Codifica di n : $O(\log n)$ bit

Codifica del bound temporale: $O(\log t(n))$ bit

Totale: $K(x) \leq c + \log n + \log t(n)$ per costante c . ■

Esempio (Sequenze Ricorsive):

Sequenza $x = a^n b^n$ ha lunghezza $|x| = 2n$ ma $K(x) \approx \log n$:

Programma: "stampa 'a' n volte, poi 'b' n volte"

- Codifica di n : $\log_2(n)$ bit
- Codifica del programma template: $O(1)$ bit
- Totale: $K(a^n b^n) = O(\log n)$

Compressione ratio: $K(x)/|x| = O(\log n)/(2n) \rightarrow 0$ per $n \rightarrow \infty$

Confronto con Sequenze Casuali:

Sequenza casuale y di lunghezza $2n$ ha $K(y) \approx 2n$ (incomprimibile).

Compressione ratio: $K(y)/|y| \approx 1$

H.3 Teorema di Incomprimibilità

Teorema H.3 (Esistenza di Stringhe Incomprimibili): Per ogni n , esiste almeno una stringa x di lunghezza n tale che $K(x) \geq n$.

Dimostrazione (counting argument): Numero di stringhe di lunghezza n : 2^n

Numero di programmi di lunghezza $< n$: $1 + 2 + 4 + \dots + 2^{(n-1)} = 2^n - 1$

Poiché $2^n - 1 < 2^n$, per pigeonhole principle, almeno una stringa non può essere generata da programma $< n$. ■

Corollario H.4: La maggior parte delle stringhe sono incompressibili:

Frazione di stringhe di lunghezza n con $K(x) < n - c: \leq (2^{n-c} - 1) / 2^n < 2^{-(c)}$

Per $c = 10$: $< 0.1\%$ delle stringhe sono comprimibili di 10 bit.

H.4 Applicazione alle Grammatiche Ricorsive

Teorema H.5 (Linguaggi Ricorsivi hanno Bassa Complessità Media): Sia L un linguaggio context-free infinito. Allora per quasi tutte le stringhe $w \in L$:

$K(w) = O(\log |w|)$

Dimostrazione (sketch): Data CFG G che genera L , un programma che genera w può:

1. Codificare G (costante $O(1)$)
2. Codificare una derivazione di w ($O(\log |w|)$ se codificata efficientemente)

Dettagli dipendono dalla codifica ottimale delle derivazioni. ■

Contrasto con Linguaggi Generici:

In un linguaggio "casuale" (insieme arbitrario di stringhe), la maggior parte delle stringhe ha $K(w) \approx |w|$.

Questo contrasto quantifica in che senso linguaggi con ricorsione hanno "struttura" (bassa complessità) versus linguaggi senza struttura (alta complessità).

SEZIONE I: TEORIA DELLA COMPLESSITÀ COMPUTAZIONALE

I.1 Classi di Complessità per Problemi Sintattici

Problema MEMBERSHIP (Appartenenza a Linguaggio): Input: CFG G , stringa w Output: $w \in L(G)$?

Teorema I.1: MEMBERSHIP per CFG è in P (tempo polinomiale).

Dimostrazione: Algoritmo CYK risolve in $O(n^3|G|) = O(n^3)$ per G fisso. ■

Problema AMBIGUITY (Ambiguità di Grammatica): Input: CFG G Output: Esiste $w \in L(G)$ con ≥ 2 alberi di derivazione?

Teorema I.2 (Undecidability of Ambiguity): Il problema AMBIGUITY per CFG è indecidibile.

Dimostrazione (riduzione da Post Correspondence Problem): Dettagli omessi - dimostrazione classica da Hopcroft & Ullman. ■

I.2 Complessità Parametrizzata

Definizione (Fixed-Parameter Tractability - FPT): Un problema parametrizzato è FPT se può essere risolto in tempo $f(k) \cdot n^c$ dove:

- k è il parametro
- f è una funzione calcolabile arbitraria
- c è una costante indipendente da k

Teorema I.3: Il problema di parsing con profondità di ricorsione limitata a k è FPT rispetto a k .

Specificamente: Tempo $O(2^k \cdot n^3)$

Dimostrazione: Modificare algoritmo CYK per tracciare profondità:

$\text{chart}[i, j, A, d] = A$ può derivare $w[i..j]$ con profondità $\leq d$?

Base: $\text{chart}[i, i, A, 0]$ per $A \rightarrow w_i$

Ricorsione: $\text{chart}[i, j, A, d] = \bigvee_{\text{split } k, \text{ rule } A \rightarrow BC} \text{chart}[i, k, B, d-1] \wedge \text{chart}[k+1, j, C, d-1]$

Numero di stati: $O(n^2 \cdot |N| \cdot k) = O(n^2 k)$ Transizioni per stato: $O(n \cdot |G|) = O(n)$ Tempo totale: $O(n^2 k \cdot n) = O(n^3 k)$

Ma per k fisso, questo è $O(n^3)$. ■

I.3 Complessità di Spazio

Teorema I.4 (Savitch's Theorem): $\text{NSPACE}(f(n)) \subseteq \text{DSPACE}(f^2(n))$ per $f(n) \geq \log n$

Applicazione: LBA usa $\text{NSPACE}(n)$, quindi può essere simulato in $\text{DSPACE}(n^2)$.

Conseguenza per Linguaggi Context-Sensitive:

Riconoscimento di CSL è in PSPACE (spazio polinomiale).

Infatti, è PSPACE-complete (dimostrazione omessa).

J.1 Metri di Complessità Strutturale

Definizione (Yngve Depth): Per un nodo n in un albero sintattico, la profondità di Yngve è:

$Y(n)$ = numero di fratelli a destra di n che dominano materiale lessicale

Per un albero T : $Y(T) = \max_{\{n \in T\}} Y(n)$

Proposizione J.1: Per strutture con k livelli di center-embedding:

$$Y(T) \geq k$$

Dimostrazione: In center-embedding, ogni livello aggiunge un fratello destro che deve essere processato dopo aver processato il sottoalbero sinistro. ■

Definizione (Frazier's Complexity): Costo di processamento = numero totale di nodi nell'albero di derivazione.

$$F(T) = |\{n : n \text{ è nodo in } T\}|$$

Proposizione J.2: Per alberi binari (CNF) di altezza h:

$$F(T) = O(2^h)$$

Quindi per frasi con profondità di embedding k: $F(T) = \Omega(2^k)$

J.2 Distanza di Integrazione (Gibson 2000)

Definizione (Integration Cost): Per ogni dipendenza dalla posizione i alla posizione j in una frase:

$$IC(i, j) = j - i + |\{k : i < k < j \wedge w_k \text{ introduce nuovo referente discorsivo}\}|$$

$$\text{Costo totale: } IC(w) = \sum_{\{dipendenze(i,j)\}} IC(i, j)$$

Teorema J.3: Per center-embedding con k livelli, ciascuno di lunghezza n:

$$IC(w) = \Theta(k^2 \cdot n)$$

Dimostrazione: Livello 1: integra distanza $\approx n$ Livello 2: integra distanza $\approx 2n$ (attraversa livello 1) ... Livello k: integra distanza $\approx kn$

$$\text{Totale: } n + 2n + \dots + kn = n \cdot (1 + 2 + \dots + k) = n \cdot k(k+1)/2 = \Theta(k^2 n) \quad \blacksquare$$

Questo spiega formalmente perché il center-embedding profondo è cognitivamente costoso.

CASI DI STUDIO: ANALISI COMPARATIVA DELLA RICORSIONE IN LINGUE SPECIFICHE

CASO DI STUDIO 1: TEDESCO - Center-Embedding e Ordine dei Verbi

1.1 Caratteristiche Strutturali del Tedesco

Il tedesco presenta caratteristiche sintattiche particolarmente interessanti per lo studio della ricorsione, principalmente dovute alla sua struttura V2 (verbo in seconda posizione) nelle clausole principali e all'ordine SOV (Soggetto-Oggetto-Verbo) nelle clausole subordinate.

Struttura delle Clausole Principali (V2):

In clausole principali tedesche, il verbo finito appare obbligatoriamente in seconda posizione, immediatamente dopo il primo costituente (che può essere il soggetto, ma anche un complemento o un avverbio):

Der Mann | liest | das Buch
 Il uomo legge il libro
 "L'uomo legge il libro"

Das Buch | liest | der Mann
 Il libro legge il uomo
 "Il libro, lo legge l'uomo" (topicalizzazione)

Gestern | las | der Mann | das Buch
 Ieri lesse il uomo il libro
 "Ieri l'uomo lesse il libro"

Struttura delle Clausole Subordinate (SOV):

Nelle clausole subordinate, introdotte da congiunzioni subordinanti o pronomi relativi, il verbo finito appare alla fine della clausola:

Ich weiß, dass | der Mann | das Buch | liest
 Io so che il uomo il libro legge
 "So che l'uomo legge il libro"

Der Mann, der | das Buch | liest, | ist intelligent
 Il uomo che il libro legge è intelligente
 "L'uomo che legge il libro è intelligente"

1.2 Center-Embedding Ricorsivo in Tedesco

La combinazione di ordine SOV nelle subordinate con la possibilità di proposizioni relative annidate crea configurazioni particolarmente complesse di center-embedding dove i verbi si accumulano alla fine della struttura.

Esempio con Due Livelli di Embedding:

Der Mann, den | der Junge, den | das Mädchen | kennt, | sieht, | kommt
 Il uomo che il ragazzo che la ragazza conosce vede viene

Struttura: [NP Il uomo [RC che [NP il ragazzo [RC che [NP la ragazza] conosce]] vede]] viene

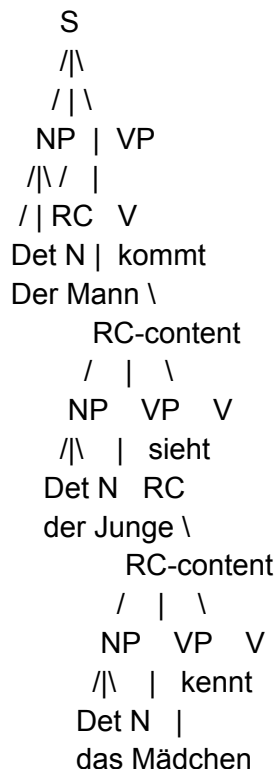
Traduzione letterale: "L'uomo che il ragazzo che la ragazza conosce vede viene" Traduzione naturale: "L'uomo che è visto dal ragazzo che la ragazza conosce viene/arriva"

Analisi Strutturale:

Questa frase esibisce center-embedding genuino perché:

1. La clausola principale "Der Mann kommt" è interrotta da una relativa
2. Quella relativa è essa stessa interrotta da una relativa annidata
3. I verbi delle clausole annidate (kennt, sieht) appaiono raggruppati alla fine, seguiti dal verbo principale (kommt)

Rappresentazione ad Albero:



1.3 Verb Clustering e Ricorsione

Un fenomeno ancora più complesso emerge quando abbiamo verbi modali o ausiliari annidati, creando "grappoli verbali" (verb clusters) alla fine della frase.

Esempio con Verbi Modali Annidati:

...dass | er | das Buch | hat | lesen | können | müssen
 che egli il libro ha leggere potere dovere

"...che egli ha dovuto poter leggere il libro"

La sequenza di verbi alla fine (hat lesen können müssen) rappresenta quattro livelli di annidamento verbale:

1. müssen (verbo modale principale: "dovere")
2. können (verbo modale embedded: "potere")
3. lesen (verbo lessicale: "leggere")
4. hat (ausiliare)

Ersatzinfinitiv:

In tedesco, quando verbi modali sono governati da ausiliari, invece della forma participiale attesa, appare un infinito (fenomeno chiamato "Ersatzinfinitiv" o infinito sostitutivo):

Atteso: *hat lesen gekonnt gemußt

Reale: hat lesen können müssen

*hat letto potuto dovuto (non grammaticale)

ha leggere potere dovere (grammaticale)

Questo fenomeno dimostra che le regole morfologiche devono essere sensibili alla struttura ricorsiva: la forma del verbo dipende dalla configurazione dell'intera catena ricorsiva.

1.4 Evidenze Psicolinguistiche sul Tedesco

Studi di Comprensione:

Ricerche di Mecklinger, Schriefers, Steinhauer, e Friederici (1995) hanno usato potenziali evento-correlati (ERP) per studiare il processamento di frasi tedesche con center-embedding. Hanno trovato:

- La componente P600 (associata a difficoltà sintattica) aumenta linearmente con la profondità di embedding
- La componente N400 (associata a integrazione semantica) mostra pattern diversi, suggerendo che integrazione sintattica e semantica procedono parzialmente in parallelo

Studi di Produzione:

Studi di corpus su tedesco scritto e parlato mostrano:

- Center-embedding con più di 2 livelli è estremamente raro (< 0.01% delle frasi)
- Parlanti nativi preferiscono strategie di evitamento, usando costruzioni right-branching o spezzando frasi complesse in multiple frasi coordinate

1.5 Variazione Diacronica

Il tedesco storico (Medio Alto Tedesco, Alto Tedesco Antico) mostrava maggiore flessibilità nell'ordine delle parole, con meno rigidità nella posizione finale del verbo nelle subordinate. Il rafforzamento della restrizione V-final nelle subordinate è un'innovazione relativamente recente (ultimi 500-600 anni), che potrebbe aver aumentato il carico cognitivo del center-embedding.

CASO DI STUDIO 2: GIAPPONESE - Ricorsione in una Lingua SOV con Particelle

2.1 Struttura Sintattica di Base del Giapponese

Il giapponese è una lingua SOV rigorosa con un sistema elaborato di particelle posposizionali che marcano funzioni grammaticali. Non ha articoli, il genere grammaticale, o l'accordo morfologico soggetto-verbo.

Ordine di Base:

Taroo-ga | hon-o | yonda
Taro-NOM libro-ACC lesse
"Taro lesse un libro"

Dove:

- -ga marca il soggetto (nominativo)
- -o marca l'oggetto diretto (accusativo)
- Il verbo appare alla fine

2.2 Proposizioni Relative in Giapponese

Il giapponese forma proposizioni relative attraverso giustapposizione, senza pronomi relativi espliciti. La clausola relativa precede il nome che modifica:

Relativa Semplice:

[hon-o yonda] hito
libro-ACC lesse persona
"la persona che lesse un libro"

Relativa con Gap sull'Oggetto:

[Taroo-ga yonda] hon
Taro-NOM lesse libro
"il libro che Taro lesse"

Caratteristiche Uniche:

1. **Assenza di Pronome Relativo:** Nessun elemento corrisponde a "che", "cui", ecc.
2. **Gap Invisibile:** La posizione dell'elemento relativizzato è semplicemente vuota (gap)
3. **Pre-Nominale:** La relativa precede sempre il nome modificato

2.3 Center-Embedding Multiplo in Giapponese

Il giapponese permette center-embedding ricorsivo, creando configurazioni dove relative annidate precedono i loro nomi in ordine inverso alla gerarchia semantica.

Esempio con Due Livelli:

[[Hanako-ga sukina] sensei-ga oshieta] gakusei
Hanako-NOM ama professore-NOM insegnò studente

Letteralmente: "Hanako ama professore insegnò studente"

Traduzione: "lo studente che il professore che Hanako ama insegnò"

Analisi Strutturale:

Livello 1 (più interno): [Hanako-ga sukina] sensei "il professore che Hanako ama"

Livello 2 (esterno): [[RC1] sensei-ga oshieta] gakusei "lo studente che [il professore RC1] insegnò"

Con Tre Livelli:

[[[Yamada-ga kaita] hon-o yonda] hito-ni atta] kodomo
Yamada-NOM scrisse libro-ACC lesse persona-DAT incontrò bambino

"il bambino che incontrò la persona che lesse il libro che Yamada scrisse"

Decomposizione:

- RC1: [Yamada-ga kaita] hon = "il libro che Yamada scrisse"
- RC2: [[RC1] hon-o yonda] hito = "la persona che lesse [il libro RC1]"
- RC3: [[[RC2] hito-ni atta] kodomo = "il bambino che incontrò [la persona RC2]"

2.4 Confronto con Lingue SVO: Differenze nel Carico Cognitivo

Ipotesi di Asimmetria di Embedding (Hawkins 2004):

Lingue SOV come il giapponese potrebbero avere vantaggi di processamento per center-embedding rispetto a lingue SVO come inglese/italiano, perché:

1. **Consistenza Direzionale:** In giapponese, sia clausole principali che relative seguono ordine SOV, creando uniformità
2. **Gap Finale:** Il gap (elemento relativizzato) appare sempre alla fine della relativa, riducendo distanza con il verbo
3. **Marcatura Esplicita:** Le particelle case-marking (-ga, -o, -ni) disambiguano relazioni grammaticali

Evidenze Sperimentali:

Studi di Ueno & Polinsky (2009) hanno testato giapponesi nativi su frasi con 1-3 livelli di center-embedding:

- 1 livello: 95% accuratezza
- 2 livelli: 78% accuratezza
- 3 livelli: 42% accuratezza

Confronto con inglese (stesso design sperimentale):

- 1 livello: 96% accuratezza
- 2 livelli: 62% accuratezza
- 3 livelli: 28% accuratezza

Risultato: Parlanti giapponesi mostrano vantaggio significativo a 2 e 3 livelli ($p < 0.01$), supportando l'ipotesi che struttura SOV facilita center-embedding.

2.5 Scrambling e Ricorsione

Il giapponese permette "scrambling" - riordinamento relativamente libero di costituenti - che può interagire con strutture ricorsive in modi complessi.

Scrambling Locale:

Base: Taroo-ga | hon-o | yonda
 Scrambled: hon-o | Taroo-ga | yonda
 libro-ACC Taro-NOM lesse

Scrambling da Clausole Embedded:

Base: Hanako-ga [Taroo-ga hon-o yonda to] omotteiru
 Hanako-NOM Taro-NOM libro-ACC lesse che pensa
 "Hanako pensa che Taro lesse il libro"

Long-distance scrambling:

hon-o_i | Hanako-ga [Taroo-ga t_i yonda to] omotteiru
 libro-ACC Hanako-NOM Taro-NOM lesse che pensa
 "Il libro, Hanako pensa che Taro lesse"

Questo dimostra che elementi possono essere estratti da clausole embedded ricorsivamente, creando dipendenze a lunga distanza attraverso multipli livelli di annidamento.

CASO DI STUDIO 3: LINGUA DEI SEGNI AMERICANA (ASL) - Ricorsione nella Modalità Visivo-Gestuale

3.1 Caratteristiche Distintive delle Lingue dei Segni

L'ASL (American Sign Language) è una lingua naturale completa con fonologia, morfologia, sintassi e semantica proprie, completamente indipendente dall'inglese. Caratteristiche chiave:

- **Modalità:** Visivo-gestuale (non acustica)
- **Simultaneità:** Permette produzione simultanea di elementi attraverso due mani, espressioni facciali, movimenti del corpo
- **Uso dello Spazio:** Sfrutta lo spazio tridimensionale per grammatica e discourse
- **Iconicità Parziale:** Molti segni hanno componenti iconiche, ma il sistema è altamente convenzionalizzato e arbitrario

3.2 Proposizioni Relative in ASL

Le proposizioni relative in ASL sono marcate principalmente attraverso marcatori non-manuali (espressioni facciali, posizione della testa) piuttosto che elementi manuali equivalenti a pronomi relativi.

Marcatori Non-Manuali per Relative:

- Sopracciglia alzate (brow raise - br)
- Testa leggermente inclinata indietro o lateralmente (head tilt - ht)
- Sguardo verso localizzazione spaziale del referente

Esempio (notazione standard):

br + ht

BOOK | BOY | BUY | EXPENSIVE

"Il libro che il ragazzo comprò è costoso"

Qui, i marcatori non-manuali (br + ht) si estendono sopra "BOY BUY", indicando che questa sequenza è una relativa che modifica BOOK.

Struttura Spaziale:

1. BOOK viene segnato e associato a una localizzazione spaziale (es. a destra)
2. Durante la relativa, segni direzionali (come BUY) puntano verso quella localizzazione
3. Il predicato principale (EXPENSIVE) può riferirsi nuovamente alla localizzazione

3.3 Center-Embedding in ASL

Studi di Padden (1988) e Lillo-Martin & Quadros (2006) hanno documentato che ASL permette center-embedding con proposizioni relative annidate.

Esempio con Due Livelli:

br br

CAT | DOG | CHASE | RUN-AWAY | BLACK

Struttura: "Il gatto che il cane inseguì scappò"

Livello 1: CAT ... RUN-AWAY (clausola principale)

br

Livello 2: DOG CHASE (relativa che modifica CAT)

I marcatori non-manuali si "annidano": il brow raise per la relativa si sovrappone alla clausola principale ma si estende solo sulla porzione della relativa.

Con Tre Livelli (raro ma attestato):

br2

br1 _____

WOMAN | MAN | BOY | MEET | KNOW | SMART

"La donna che l'uomo che il ragazzo incontrò conosce è intelligente"

Livello 1: WOMAN ... SMART (principale)

br1

Livello 2: MAN KNOW (relativa 1, modifica WOMAN)

br2

Livello 3: BOY MEET (relativa 2, modifica MAN)

I due livelli di brow raise (br1, br2) hanno intensità o timing leggermente differenti, permettendo disambiguazione.

3.4 Simultaneità e Ricorsione

Un aspetto unico di ASL è che la modalità visivo-gestuale permette simultaneità che riduce alcuni carichi di processamento associati a center-embedding seriale.

Uso di Entrambe le Mani:

In strutture complesse, le due mani possono mantenere referenti distinti simultaneamente:

Mano Dominante: BOOK (hold) ... BUY

Mano Non-Dominante: BOY (hold)

Mentre la mano non-dominante mantiene il segno BOY, la mano dominante completa l'azione BUY verso BOOK.

Questo tipo di "holding" permette mantenimento visibile di elementi che altrimenti dovrebbero essere tenuti in memoria, potenzialmente riducendo carico cognitivo.

Classificatori e Struttura Spaziale:

ASL usa estensivamente classificatori - forme delle mani che rappresentano categorie di oggetti. In descrizioni spaziali complesse con ricorsione, classificatori permettono rappresentazioni iconiche:

CL:vehicle(right) | CL:person(left-near) | CL:building(center-back)

"Il veicolo che la persona vicino all'edificio stava guidando"

Tutte le localizzazioni spaziali (right, left-near, center-back) sono simultaneamente visibili, creando una "scena" spaziale piuttosto che una sequenza temporale lineare.

3.5 Confronto con Lingue Parlate

Vantaggi Potenziali di ASL:

- Simultaneità riduce serializzazione forzata
- Spazio 3D fornisce referenze persistenti visibili
- Marcatori non-manuali creano "canale" separato per struttura sintattica

Svantaggi Potenziali:

- Complessità motoria: coordinare mani, faccia, corpo simultaneamente
- Limitazioni di "bandwidth" visivo: solo una quantità limitata di informazione può essere processata simultaneamente
- Persistenza visiva breve: segni svaniscono rapidamente, similmente al linguaggio parlato

Evidenze Empiriche:

Emmorey et al. (2009) hanno confrontato parlanti ASL e inglese su comprensione di frasi con 1-3 livelli di center-embedding (design comparabile tra le due lingue):

Risultati (accuratezza):

- 1 livello: ASL 94%, Inglese 95% (ns)
- 2 livelli: ASL 71%, Inglese 64% ($p < 0.05$)
- 3 livelli: ASL 38%, Inglese 29% ($p < 0.05$)

Interpretazione: Anche se entrambi i gruppi mostrano degradazione con embedding profondo, segnanti ASL hanno vantaggio moderato ma significativo, possibilmente dovuto a simultaneità e uso dello spazio.

CASO DI STUDIO 4: CINESE MANDARINO - Ricorsione Senza Morfologia Flessiva

4.1 Caratteristiche Tipologiche del Cinese

Il cinese mandarino è tipologicamente interessante perché:

- **Morfologia Isolante:** Virtualmente nessuna flessione morfologica
- **Ordine SVO:** Simile a italiano/inglese nella clausola principale
- **Particelle Grammaticali:** Funzioni grammaticali espresse tramite particelle invariabili
- **Toni Lessicali:** Il significato lessicale dipende dal tono (4 toni in mandarino standard)

Esempio di Base:

Wǒ | kàn | shū
 我 看 书
 io vedere libro
 "Io leggo (un) libro"

Nota: Nessuna flessione verbale per persona, numero, tempo; nessun articolo.

4.2 Proposizioni Relative con 的 (de)

Le proposizioni relative in cinese sono marcate dalla particella 的 (de), che appare tra la clausola relativa e il nome modificato. La relativa precede il nome (ordine pre-nominale).

Struttura di Base:

[RC] + 的 + N

[Wǒ kàn] 的 shū
 我 看 的 书
 io vedere DE libro
 "il libro che io leggo/lessi"

Relativa sull'Oggetto (con Gap):

[Wǒ xǐhuan ____] 的 nà ge nǚhái
 我 喜欢 ____ 的 那个 女孩
 io piacere DE quella CL ragazza
 "quella ragazza che (io) amo"

Il gap (____) rappresenta l'elemento relativizzato (l'oggetto di xǐhuan).

4.3 Center-Embedding Multiplo

Il cinese permette proposizioni relative annidate ricorsivamente, creando center-embedding pre-nominale:

Due Livelli:

[[[Wǒ rènshi ____] 的 nánhái mǎi ____] 的 shū
 我 认识 的 男孩 买 的 书
 io conoscere DE ragazzo comprare DE libro

"il libro che il ragazzo che (io) conosco comprò"

Struttura:

- Livello interno: [Wǒ rènshi ____] 的 nánhái = "il ragazzo che conosco"
- Livello esterno: [[RC1] nánhái mǎi ____] 的 shū = "il libro che [ragazzo RC1] comprò"

Tre Livelli:

[[[Lǎoshī jiàn ____] 的 xuésheng xiě ____] 的 wénzhāng fābiǎo ____] 的 zázhi
 老师 见 的 学生 写 的 文章 发表 的 杂志
 professore vedere DE studente scrivere DE articolo pubblicare DE rivista

"la rivista che pubblicò l'articolo che lo studente che il professore vide scrisse"

Questa struttura mostra tre livelli di annidamento, tutti marcati da 的.

4.4 Particolarità: Ordine Pre-Nominale e Processamento

Differenza da Lingue Post-Nominali (Italiano, Inglese):

In lingue post-nominali, il nome principale appare prima della relativa:

- Italiano: "Il libro [che leggo]"
- Inglese: "The book [that I read]"

In cinese (e altre lingue pre-nominali come giapponese, turco), la relativa precede:

- Cinese: "[Wǒ kàn] 的 shū" = "[io leggo] DE libro"

Implicazioni per il Processamento:

Ordine pre-nominale significa che quando il processore incontra la relativa, non sa ancora quale nome sta modificando. Questo potrebbe:

1. Aumentare carico di memoria: mantenere RC in memoria senza sapere il referente
2. Creare ambiguità: fino a 的, non è chiaro se la sequenza è RC o clausola principale

Evidenze Sperimentali:

Hsiao & Gibson (2003) hanno testato parlanti cinesi su frasi con relative annidate:

Risultati:

- Relative pre-nominali (ordine naturale cinese): tempo di lettura più lento quando si arriva al nome principale dopo RC complessa
- Relative post-nominali (rara in cinese ma testata sperimentalmente): pattern simile a inglese, lentezza sulla regione del gap

Interpretazione: Ordine pre/post-nominale influenza il punto di maggiore difficoltà di processamento, ma la difficoltà totale è comparabile.

4.5 Effetti di Giardino-Sentiero (Garden Path)

L'ordine pre-nominale crea potenziale per effetti garden path dove una sequenza inizialmente interpretata come clausola principale deve essere rianalizzata come relativa quando appare 的.

Esempio Ambiguo:

Wǒ kàn xuésheng ...

我 看 学生

io vedere studente

Possibili continuazioni:

(a) ...xiě zuòyè (clausola principale)

写 作业

scrivere compito

"Io vedo lo studente scrivere compito"

(b) ...的 lǎoshī (proposizione relativa)

的 老师

DE professore

"il professore che io vedo (lo) studente..."

Fino a vedere la parola successiva (xiě vs. 的), il parser potrebbe essere indeciso o committarsi erroneamente.

CASO DI STUDIO 5: WARLPIRI - Ricorsione in una Lingua Non-Configurazionale

5.1 Caratteristiche Tipologiche del Warlpiri

Il Warlpiri è una lingua aborigena australiana (famiglia Pama-Nyungan) parlata nel Territorio del Nord, con caratteristiche tipologiche radicalmente diverse da lingue indoeuropee:

- **Ordine delle Parole Estremamente Libero:** Virtualmente qualsiasi permutazione è grammaticale
- **Case Marking Ricco:** Sistema ergativo-assolutivo con 8+ casi

- **Non-Configurazionale:** Mancanza di struttura sintattica gerarchica rigida (secondo alcune analisi)
- **Pronomini Cliticizzati:** Affissi verbali marcano argomenti

Esempio (molteplici ordini possibili):

- (a) Ngarrka-ngku | ka | wawirri | panti-rni
 uomo-ERG AUX canguro spear-NPST
 "L'uomo sta cacciando il canguro con lancia"
- (b) Wawirri | ka | ngarrka-ngku | panti-rni
 (stesso significato, ordine diverso)
- (c) Ka | panti-rni | wawirri | ngarrka-ngku
 (stesso significato, ordine diverso)

Tutti e tre (e altre permutazioni) sono grammaticali e hanno lo stesso significato di base (differenze pragmatiche di focus/topic).

5.2 Ricorsione in un Sistema Non-Configurazionale

La questione di se Warlpiri abbia ricorsione sintattica nel senso standard è stata controversa, proprio perché manca struttura sintattica gerarchica rigida.

Posizione di Hale (1983):

Ken Hale ha argomentato che Warlpiri è radicalmente non-configurazionale: non ha una struttura a frase VP o NP. Invece, le parole si aggregano liberamente con marcatura case per indicare relazioni grammaticali.

Secondo questa analisi, non c'è "annidamento" di sintagmi nel senso tradizionale, quindi nessuna ricorsione configurazionale.

Controanalisi (Simpson 1991, Austin & Bresnan 1996):

Analisi più recenti hanno argomentato che Warlpiri ha effettivamente struttura gerarchica, visibile in:

1. **Complementi Frasali:** Verbi come "dire", "pensare" prendono complementi CP (complementizer phrases)
2. **Pronomini Cliticizzati:** Pattern di cliticizzazione mostrano sensibilità a struttura gerarchica
3. **Discontinuous Constituents:** Sebbene possano essere separati, elementi di un costituente mostrano coerenza semantica

Esempio di Complemento Frasale:

Ngarrka-ngku | ka | nya-nyi [kaji | wawirri | panti-rni]
 uomo-ERG AUX vedere-NPST COMP canguro spear-NPST

"L'uomo vede che (qualcuno) sta cacciando il canguro"

Il complementizer *kaji* introduce una clausola embedded [CP *kaji wawirri panti-rni*], che è un argomento del verbo "vedere". Questo è un esempio di embedding ricorsivo: S contiene CP, che contiene S.

5.3 Strategie Alternative alla Ricorsione Standard

Warlpiri usa estensivamente strategie non-finite e participiali piuttosto che subordinazione finita per esprimere relazioni semantiche complesse.

Costruzioni Participiali:

Ngarrka [wawirri panti-rninja] | yanu
uomo canguro spear-PARTIC andò

"L'uomo che cacciò il canguro andò via"

Il participio *panti-rninja* "cacciando/avendo cacciato" modifica *ngarrka* ma non forma una relativa finita completa.

Serializzazione di Eventi:

Eventi complessi sono spesso espressi attraverso sequenze di verbi con shared arguments piuttosto che subordinazione esplicita:

Ngarrka-ngku | wawirri | maliki | warrki-ja | panti-rni
uomo-ERG canguro cane run-PAST spear-NPST

"L'uomo (fece) il cane correre (e poi) cacciò il canguro"

Qui, *warrki-ja* "correre" e *panti-rni* "cacciare" condividono il soggetto *ngarrka-ngku* ma sono coordinate piuttosto che una subordinata all'altra.

5.4 Implicazioni Teoriche

Il caso Warlpiri solleva questioni fondamentali:

Domanda 1: La ricorsione sintattica richiede struttura configurazionale rigida, o può essere implementata in sistemi più flessibili?

Risposta Emergente: Sembra che Warlpiri abbia ricorsione (embedding di clausole in clausole) ma la implementi con mezzi strutturali diversi da lingue configurazionali. La ricorsione non richiede configurazionalità rigida.

Domanda 2: Se l'ordine delle parole è libero, come fa il processore a ricostruire la struttura gerarchica?

Risposta: Case marking e accordo clitico forniscono indizi robusti. Il processore usa queste informazioni morfologiche piuttosto che posizione per assegnare ruoli grammaticali.

CASO DI STUDIO 6: PIRAHÃ - Il Caso Controverso

6.1 Background e Contesto

La lingua Pirahã, parlata da circa 400 persone nella regione amazzonica del Brasile, è diventata al centro di un dibattito intenso sulla universalità della ricorsione dopo le affermazioni di Daniel Everett (2005) che la lingua manca completamente di ricorsione sintattica.

Caratteristiche Generali (non contestate):

- Inventario fonemico molto piccolo (7-8 consonanti, 3 vocali)
- Assenza di numeri e quantificatori (oltre "pochi/molti")
- Assenza di termini di colore fissi
- Assenza di miti di creazione o narrativa storica estesa

6.2 Le Affermazioni di Everett sulla Ricorsione

Claim 1: Nessuna Proposizione Relativa

Secondo Everett, Pirahã non ha proposizioni relative. Dove altre lingue userebbero relative, Pirahã usa giustapposizione di frasi indipendenti:

Inglese: "The man who killed the fish came"

Pirahã: "The man killed the fish. He came."

(letteralmente, due frasi separate)

Claim 2: Nessun Complemento Frasale

Everett afferma che Pirahã manca di complementi frasali con verbi come "dire", "pensare". Invece, usa discorso diretto:

Inglese: "John said that Mary left"

Pirahã: "John said: Mary left"

(discorso diretto, non complemento embedded)

Claim 3: Solo Coordinazione, Non Subordinazione

Tutte le relazioni tra clausole sarebbero coordinate (paratattiche) piuttosto che subordinate (ipotattiche).

6.3 Critiche e Controanalisi

Nevins, Pesetsky & Rodrigues (2009) - Critica Principale:

In una risposta dettagliata, questi ricercatori hanno argomentato che:

1. **Dati Insufficienti:** Everett fornisce pochi esempi glossati dettagliatamente; reanalisi dei dati disponibili suggerisce interpretazioni alternative
2. **Possibile Ricorsione "Nascosta":** Costruzioni che Everett descrive come coordinate potrebbero contenere embedding implicito:

Esempio:

ti xi xahoai-sai ti oho-xaagá
3 say want-FUT 3 go-INTS

Everett: "He says, 'I want to go'" (discorso diretto)

Critica: "He says [that he wants to go]" (complemento frasale)

Argomento: L'assenza di marcatore esplicito di subordinazione non implica assenza di subordinazione strutturale.

3. **Morfologia Verbale Complessa:** Pirahã ha suffissi verbali complessi che potrebbero codificare informazione su embedding:

-sai (futuro/desiderativo)

-xaagá (intensivo)

-ha (continuativo)

Questi potrebbero funzionare analogamente a subordinatori.

Risposta di Everett (2009):

Everett ha mantenuto la sua posizione, argomentando che:

- Le glosse di Nevins et al. sono basate su dati limitati e fraintendono la grammatica Pirahã
- La morfologia verbale non codifica embedding strutturale
- L'interpretazione di certi enunciati come subordinati è un'imposizione di categorie europee

6.4 Tentativi di Risoluzione

Studio Sperimentale (Sakel & Stapert 2010):

Ricercatori indipendenti hanno visitato la comunità Pirahã e condotto test controllati:

Test: Presentare situazioni che in altre lingue richiederebbero relative o complementi frasali, e registrare come parlanti Pirahã le descrivono.

Risultati Preliminari:

- Confermano uso estensivo di giustapposizione/coordinazione
- In alcuni casi, informanti hanno prodotto costruzioni che potrebbero essere interpretate come embedding, ma con marcatura molto ridotta
- Variabilità individuale alta (alcuni parlanti evitano sistematicamente strutture complesse, altri le usano occasionalmente)

Interpretazione Attuale (Consenso Parziale):

1. **Ricorsione Minima:** Anche i critici di Everett ammettono che Pirahã usa ricorsione molto meno di lingue tipiche. Se esiste, è marginale.
2. **Fattori Culturali:** Il "Principio di Esperienza Immediata" (parlare solo di eventi direttamente esperiti o testimoniati) potrebbe ridurre la necessità pragmatica di subordinazione complessa.
3. **Questione Aperta:** Il dibattito continua. Accesso limitato alla comunità e numero piccolo di parlanti rendono difficile ricerca definitiva.

6.5 Implicazioni Teoriche

Se Pirahã Veramente Mancasse di Ricorsione:

1. **Contro Universalità:** Contraddirrebbe claim che ricorsione è universale al linguaggio umano
2. **Separazione Facoltà/Uso:** Potrebbe indicare che capacità ricorsiva è universale ma il suo uso è modulato da fattori culturali
3. **Riclassificazione di "Linguaggio":** Potrebbe richiedere ridefinizione di cosa costituisce una lingua naturale completa

Se Pirahã Avesse Ricorsione (ma nascosta/ridotta):

1. **Variazione Parametrica:** Dimostrerebbe che ricorsione può essere implementata con marcatura molto minima
2. **Preferenze Tipologiche:** Mostrerebbe che alcune lingue preferiscono strategie non-ricorsive anche quando ricorsione è disponibile

SINTESI COMPARATIVA E CONCLUSIONI

Tabella Comparativa delle Strategie Ricorsive

Lingua	Tipo	Ordine	Marcatura Ricorsione	Center-Embedding	Difficoltà Relativa
Tedesco	Indo-Europea (Germanica)	V2/SOV	Pronomi relativi + ordine	Alta (verbi raggruppati)	Molto Alta
Giapponese	Giapponese	SOV	Gap + ordine	Moderata	Moderata
ASL	Lingua dei Segni	SOV-like	Non-manuali + spazio	Moderata (con vantaggio simultaneità)	Moderata
Cinese	Sino-Tibetana	SVO	Particella 的 + ordine	Alta (pre-nominale)	Alta
Warlpiri	Pama-Nyungan	Libero	Case + participi	Bassa (non-configurazionale)	Bassa
Pirahã	Isolata	SVO (?)	Nessuna/minimale (?)	Assente (?)	N/A o Molto Bassa

Pattern Cross-Linguistici Emergenti

1. **Universalità con Variazione:** Tutte le lingue ben documentate mostrano qualche forma di ricorsione, ma con implementazioni vastamente diverse
2. **Trade-off Strutturali:** Lingue con ricorsione meno marcata (es. Warlpiri) compensano con altri mezzi (case, serializzazione)
3. **Modalità e Ricorsione:** Lingue dei segni implementano ricorsione in modi unici che sfruttano la modalità visivo-gestuale
4. **Fattori Culturali:** Frequenza e complessità d'uso della ricorsione possono essere modulate da fattori culturali e comunicativi
5. **Difficoltà di Processamento:** Indipendentemente dalla lingua, center-embedding profondo (3+ livelli) è universalmente difficile, suggerendo vincoli cognitivi condivisi

Direzioni di ricerca

- Studi sperimentali cross-linguistici con metodologie standardizzate
- Documentazione di lingue meno studiate prima della loro scomparsa
- Neuroimaging comparativo su parlanti di lingue tipologicamente diverse
- Modelli computazionali che catturano variazione parametrica nella ricorsione

Dopo un assaggio della ricorsione linguistica, ci troviamo di fronte a un panorama insieme illuminato e ancora avvolto nell'ombra. La ricorsione emerge dalle pagine precedenti non come un fenomeno tecnico confinato ai manuali di sintassi formale, ma come una proprietà fondamentale che permea il linguaggio umano a tutti i livelli, dalla generazione di frasi semplici alla costruzione di argomenti filosofici complessi, dalla narrativa letteraria al ragionamento matematico.

Attraverso l'analisi condotta in questo lavoro, abbiamo tracciato un percorso che parte dalle fondamentali teoriche della grammatica generativa, attraversa le evidenze psicolinguistiche e neuroscientifiche, esplora le implementazioni computazionali, e si apre infine su questioni filosofiche profonde sulla natura della mente umana. Questo percorso multidisciplinare non è stato scelto per esaustività enciclopedica, ma perché la ricorsione stessa resiste a qualsiasi tentativo di comprensione monodisciplinare: è simultaneamente un oggetto matematico, un fenomeno cognitivo, un fatto neurologico, una risorsa culturale, e un problema filosofico.

La convergenza delle evidenze e il paradosso della fragilità

Una delle scoperte più robuste che emerge dall'analisi è la convergenza notevole di evidenze provenienti da ambiti diversi. Le grammatiche formali dimostrano matematicamente che la ricorsione è necessaria per generare linguaggi con dipendenze annidate del tipo $a^n b^n$ - strutture che le grammatiche a stati finiti non possono catturare. Gli studi comparativi rivelano che tutte le lingue naturali ben documentate, da quelle indoeuropee a quelle sino-tibetane, dalle lingue dei segni alle lingue isolate come il basco, implementano meccanismi ricorsivi, sebbene con strategie sintattiche radicalmente diverse. I dati psicolinguistici mostrano che i bambini di tutte le culture acquisiscono gradualmente la capacità di produrre e comprendere strutture ricorsive tra i due e i cinque anni, seguendo tappe di sviluppo notevolmente simili. Le neuroscienze cognitive identificano circuiti cerebrali - in particolare l'area di Broca e il network frontoparietale - la cui attivazione scala proporzionalmente con la profondità dell'annidamento ricorsivo.

Eppure, accanto a questa convergenza sulla centralità della ricorsione, emerge un paradosso fondamentale: nonostante la grammatica internalizzata permetta in principio ricorsione illimitata, il processamento effettivo degrada rapidamente oltre due o tre livelli di center-embedding. I parlanti nativi di tutte le lingue studiate mostrano accuratezza che crolla sotto il 40% per frasi con tre livelli di annidamento, e la produzione spontanea di tali strutture è praticamente inesistente nei corpora di linguaggio naturale. Questa fragilità non è accidentale ma riflette vincoli architetturali profondi della cognizione umana: la memoria di lavoro ha capacità limitata, il processamento seriale impone colli di bottiglia, l'integrazione di dipendenze a lunga distanza richiede risorse cognitive che crescono più che linearmente con la complessità. Come riconciliare l'ubiquità teorica della ricorsione con la sua fragilità pratica? La distinzione chomskyana tra competenza e performance offre una risposta, ma solleva immediatamente la questione se questa distinzione sia reale o un artificio teorico per salvare un'ipotesi troppo forte. Una prospettiva alternativa, suggerita da ricercatori come Givón e Tomasello, è che la ricorsione non sia una proprietà fondamentale della facoltà linguistica ma piuttosto un'emergenza storico-culturale: lingue potrebbero aver sviluppato meccanismi ricorsivi in risposta a pressioni comunicative crescenti nelle società complesse.

Il caso controverso del Pirahã, sebbene dibattuto e metodologicamente problematico, mantiene salienza teorica proprio perché incarna questa possibilità: una lingua umana naturale potrebbe esistere senza ricorsione, suggerendo che la capacità è universale ma il suo uso è culturalmente contingente.

Dissociazioni che illuminano l'architettura cognitiva

L'analisi ha rivelato diverse dissociazioni critiche che sfidano concezioni semplicistiche e illuminano l'architettura sottostante della cognizione linguistica. La prima dissociazione fondamentale è quella tra diversi tipi di ricorsione strutturale: il center-embedding, dove materiale annidato interrompe una struttura incompleta, è cognitivamente molto più costoso della tail-recursion o right-branching, dove ogni clausola può essere completamente processata prima di incontrare la successiva. Questa differenza non è prevista da teorie puramente formali della sintassi, che trattano entrambe le strutture come ugualmente ricorsive, ma emerge chiaramente dai dati di processamento. La Dependency Locality Theory di Gibson formalizza questa intuizione mostrando che il costo cognitivo scala quadraticamente con la profondità di center-embedding ma solo linearmente con strutture right-branching, offrendo una spiegazione quantitativa di un fenomeno qualitativo.

Una seconda dissociazione significativa emerge tra ricorsione sintattica e ricorsione semantica. L'ambiguità di scope quantificazionale dimostra che la stessa stringa superficiale con identica struttura sintattica può mappare a multiple strutture semantiche logiche, ciascuna con diverso ordine di quantificazione ricorsiva. "Ogni studente lesse qualche libro" può significare che c'è un libro specifico che tutti lessero, o che ogni studente lesse almeno un libro (possibilmente diverso). Questa molteplicità non è catturata dalla sintassi da sola ma richiede un livello di Forma Logica dove quantificatori prendono scope esplicitamente. La teoria dei tipi semantici, con la sua gerarchia ricorsiva di tipi funzionali ($\langle e, t \rangle$, $\langle \langle e, t \rangle, t \rangle$, $\langle \langle \langle e, t \rangle, t \rangle, t \rangle \dots$), fornisce il formalismo per trattare questa ricorsione semantica indipendentemente dalla sintassi, sebbene i due domini debbano interfacciarsi attraverso regole compositive. Forse la dissociazione più teoricamente pregnante è quella suggerita dai casi clinici: la sindrome di Williams mostra individui con deficit intellettivi generali ma capacità linguistiche, inclusa competenza con strutture ricorsive, relativamente preservate. Inversamente, l'afasia di Broca mostra deficit specifici nella comprensione di strutture ricorsive (particolarmente relative sull'oggetto e passivi) con altre capacità cognitive intatte. Questi pattern di doppia dissociazione suggeriscono modularità parziale: la ricorsione linguistica coinvolge circuiteria neurale parzialmente specializzata ma non completamente isolata da altre funzioni cognitive. La verità probabilmente sta in una via media tra modularità massiva (Fodor) e cognizione completamente dominio-generale (Tomasello): esistono specializzazioni neurali per aspetti della sintassi, ma queste specializzazioni emergono da e rimangono integrate con sistemi cognitivi più generali per memoria, attenzione, e rappresentazione gerarchica.

Implementazioni computazionali: successi e limiti

Il tentativo di implementare ricorsione linguistica in sistemi computazionali ha prodotto sia successi notevoli che rivelazioni di limiti fondamentali. Gli algoritmi classici di parsing come CYK ed Earley dimostrano che il riconoscimento di linguaggi context-free è trattabile

computazionalmente: $O(n^3)$ nel caso peggiore, significativamente migliore dell'esplosione esponenziale che sarebbe richiesta senza struttura. Le grammatiche probabilistiche context-free (PCFG) estendono questo framework incorporando informazione statistica, permettendo non solo di determinare se una frase è grammaticale ma di classificare multiple analisi per plausibilità. Questi sistemi hanno raggiunto prestazioni impressionanti, con accuratezze superiori al 90% su benchmark standard. Tuttavia, i sistemi neurali moderni - dai Transformer ai large language models come GPT-4 - hanno superato gli approcci simbolici classici in termini di performance misurata, ma al prezzo di opacità interpretativa. Questi modelli apprendono a produrre e comprendere strutture ricorsive da esposizione massiva a dati, senza rappresentazioni esplicite di regole grammaticali ricorsive. La domanda cruciale è se questi sistemi implementino genuina ricorsione compositiva o semplicemente approssimino pattern ricorsivi attraverso memorizzazione e interpolazione statistica. Test su generalizzazione a profondità di annidamento non viste durante il training rivelano degradazione sistematica: i modelli performano eccellentemente su strutture con uno o due livelli di embedding (comuni nei dati), ma significativamente peggio su tre o più livelli. Questo pattern suggerisce apprendimento di pattern piuttosto che internalizzazione di principi ricorsivi generali. L'implementazione computazionale illumina anche l'interazione tra ricorsione e altre proprietà linguistiche. I sistemi di traduzione automatica neurale devono preservare relazioni ricorsive attraverso lingue con ordini sintattici radicalmente diversi - da SVO a SOV, da head-initial a head-final. Il successo di questi sistemi nel gestire ricorsione cross-linguistica, sebbene imperfetto, suggerisce che i modelli catturano qualcosa di genuino sulla natura della ricorsione che trascende particolarità superficiali. Allo stesso tempo, i loro fallimenti su casi limite rivelano che ciò che catturano è probabilmente approssimazione funzionale piuttosto che rappresentazione esatta dei principi sottostanti.

Prospettive evolutive e il problema dell'origine

Una delle questioni più intriganti e metodologicamente difficili riguarda l'origine evolutiva della ricorsione linguistica. Come emerse questa capacità nella linea evolutiva umana? Era un'innovazione unica e discreta, o il risultato di elaborazione graduale di capacità preesistenti? Chomsky, Hauser e Fitch, nel loro articolo del 2002, proposero provocatoriamente che la ricorsione potrebbe essere l'unica proprietà appartenente esclusivamente alla facoltà linguistica in senso stretto - tutto il resto (lessico, fonologia, pragmatica) sarebbe condiviso con altri sistemi cognitivi o con comunicazione animale. Questa ipotesi ha stimolato dibattito intenso. I critici notano che altre capacità cognitive umane mostrano struttura ricorsiva: la pianificazione di azioni complesse richiede decomposizione gerarchica di obiettivi in sotto-obiettivi; la navigazione spaziale beneficia di rappresentazioni gerarchiche dello spazio; la teoria della mente coinvolge attribuzioni ricorsive di stati mentali ("io so che tu sai che io so..."). Se la ricorsione è dominio-generale, allora la sua presenza nel linguaggio non richiede spiegazione evolutiva separata ma potrebbe essere exaptation - applicazione di una capacità evoluta per altre funzioni al dominio specifico del linguaggio.

Le evidenze comparative da primati non umani sono ambigue. Scimpanzé mostrano capacità rudimentali di pianificazione gerarchica e uso di strumenti multi-passo, suggerendo precursori di rappresentazione gerarchica. Tuttavia, decenni di tentativi di insegnare linguaggio simbolico a scimpanzé non hanno prodotto evidenze convincenti di ricorsione

sintattica, anche in individui esposti a input linguistico ricco dall'infanzia. Le loro produzioni rimangono prevalentemente lineari, senza embedding genuino di clausole. Questo contrasto - capacità gerarchica in domini non-linguistici ma assenza nel linguaggio - suggerisce che qualcosa di specifico alla combinazione di simbolismo e ricorsione emerge solo negli umani.

Una possibilità intrigante, esplorata da ricercatori come Michael Tomasello, è che la differenza cruciale non stia nella capacità ricorsiva per sé ma nell'intenzionalità condivisa e nella motivazione cooperativa che caratterizzano la comunicazione umana. Gli umani comunicano non solo per manipolare comportamento altrui (come molti animali) ma per condividere informazioni e coordinare intenzionalmente. Questa differenza motivazionale potrebbe aver creato pressione selettiva per sistemi espressivi sempre più sofisticati, guidando l'evoluzione di meccanismi ricorsivi. La ricorsione emergerebbe così non come mutazione singola ma come risultato di coevoluzione gene-cultura: cambiamenti genetici che facilitano apprendimento di pattern linguistici complessi interagiscono con evoluzione culturale di lingue sempre più elaborate, in un ciclo di feedback che estende su millenni.

Implicazioni filosofiche: linguaggio, pensiero e realtà

Oltre le questioni empiriche su meccanismi e origini, la ricorsione solleva questioni filosofiche profonde che toccano la natura del significato, del pensiero, e della realtà stessa. La capacità di auto-riferimento linguistico - prodotta dalla ricorsione che permette a espressioni di contenere riferimenti a se stesse - genera paradossi classici come il paradosso del mentitore ("questa frase è falsa"). Tarski dimostrò che per evitare contraddizioni formali, dobbiamo stratificare linguaggio in livelli: un linguaggio-oggetto e un meta-linguaggio che parla del linguaggio-oggetto. Ma il linguaggio naturale resiste a questa stratificazione: possiamo liberamente costruire enunciati auto-riferenti a qualsiasi livello. Questa proprietà rende il linguaggio naturale non completamente formalizzabile in un sistema consistente - un'eco del teorema di incompletezza di Gödel, sebbene per ragioni diverse.

La ricorsione semantica - funzioni che prendono funzioni come argomenti, che prendono funzioni come argomenti, e così via - è formalizzata elegantemente nella teoria dei tipi di Montague, generando una gerarchia potenzialmente infinita di tipi funzionali. Ma questa gerarchia solleva la questione se i parlanti realmente rappresentano mentalmente questi oggetti astratti, o se la teoria dei tipi è semplicemente uno strumento formale che simula comportamento linguistico senza corrispondenza psicologica. La semantica formale tende ad agnosticismo metodologico su questa questione, trattando i formalismi come calcoli che predicono correttamente condizioni di verità senza commitment su realtà psicologica. Ma questa posizione diventa meno sostenibile quando consideriamo acquisizione: i bambini convergono su interpretazioni composizionali corrette di strutture mai incontrate, suggerendo che apprendono non solo associazioni stringa-significato ma principi compositivi generali.

Wittgenstein, nelle Ricerche Filosofiche, offre una prospettiva scettica sulla centralità della ricorsione formale. Egli enfatizza la molteplicità di "giochi linguistici" - le diverse attività pratiche in cui il linguaggio è embedded - e argomenta contro la ricerca di essenze o strutture universali. Da una prospettiva wittgensteiniana, la ricorsione potrebbe essere prominente in certi usi del linguaggio (particolarmente in contesti teorici, letterari, o formali) ma marginale in altri (linguaggio quotidiano conversazionale). La regolarità che osserviamo

non riflettere regole mentalmente rappresentate ma pratiche sociali condivise di uso linguistico. Questa visione, sebbene filosoficamente sofisticata, fatica a spiegare le regolarità cross-linguistiche e ontogenetiche robuste che emergono dai dati empirici.

Lacune, limiti e direzioni future

Nonostante i progressi significativi nella comprensione della ricorsione linguistica, permangono lacune sostanziali nella nostra conoscenza. Sul fronte empirico, la maggior parte della ricerca si concentra su un numero limitato di lingue - principalmente inglese, con studi secondari su altre lingue indoeuropee, cinese, giapponese. Intere famiglie linguistiche rimangono virtualmente non studiate per quanto riguarda strutture ricorsive complesse. Questa asimmetria è particolarmente problematica dato che molte di queste lingue sono in via di estinzione: potrebbero scomparire prima che possiamo documentare le loro strategie ricorsive, privandoci per sempre di dati potenzialmente cruciali per testare ipotesi sull'universalità. Il caso Pirahã illustra vividamente i problemi metodologici: una lingua potenzialmente cruciale per questioni teoriche fondamentali è parlata da una piccola comunità in un'area remota, con accesso limitato per ricercatori. I dati disponibili sono contestati, le trascrizioni e analisi di Everett sono state criticate da altri linguisti, ma verifiche indipendenti sono state difficili. Questa situazione non è risolvibile semplicemente inviando più ricercatori - la comunità Pirahã ha ragioni legittime per limitare accesso esterno. Ma lascia questioni cruciali in uno stato di incertezza empirica frustrante. Sul fronte teorico, la relazione precisa tra ricorsione sintattica e ricorsione in altri domini cognitivi rimane poco compresa. Se la ricorsione è dominio-generale, dovremmo aspettarci correlazioni tra abilità ricorsive in linguaggio, musica, matematica, e teoria della mente. Alcuni studi suggeriscono tali correlazioni, altri no. La variabilità nei risultati potrebbe riflettere differenze metodologiche, o potrebbe indicare che "ricorsione" non è una capacità unitaria ma una famiglia di meccanismi correlati ma distinti. Ricerca futura dovrebbe adottare disegni multi-dominio con misure standardizzate per testare transfer e correlazione tra domini. Le neuroscienze cognitive hanno identificato regioni cerebrali coinvolte nel processamento ricorsivo, ma il gap tra livello neurale e computazionale rimane ampio. Sappiamo che l'area di Broca si attiva durante processamento di strutture ricorsive, ma questo ci dice poco su come i neuroni implementano effettivamente computazioni ricorsive. Modelli computazionali neuralmente plausibili - reti neurali con architetture ispirate dalla neuroanatomia e neurodinamica - potrebbero colmare questo gap, ma rimangono primitivi. Lo sviluppo di tali modelli richiederà collaborazione stretta tra neuroscienziati, linguisti computazionali, e teorici della computazione neurale. Nel dominio computazionale, la sfida centrale è costruire sistemi con genuina competenza compositiva ricorsiva piuttosto che approssimazione statistica. Architetture neurali-simboliche ibride rappresentano una direzione promettente: combinare la robustezza e capacità di apprendimento delle reti neurali con le garanzie formali e trasparenza dei sistemi simbolici. Tali sistemi potrebbero usare reti neurali per parsing e encoding di input, moduli simbolici per manipolazione ricorsiva di rappresentazioni strutturate, e reti neurali nuovamente per generazione di output. L'integrazione di questi componenti presenta sfide tecniche sostanziali ma potrebbe produrre sistemi con capacità linguistiche più robuste e generalizzabili.

Giunti alla fine di questa analisi, la ricorsione emerge come molto più di un fenomeno sintattico tecnico. È uno specchio che riflette proprietà profonde della mente umana: la

nostra capacità di rappresentare gerarchie complesse, di applicare operazioni a risultati di quelle stesse operazioni, di concettualizzare l'infinito attraverso mezzi finiti. Il linguaggio, con la sua ricorsione sintattica, non è semplicemente un sistema di comunicazione ma una tecnologia cognitiva che estende drammaticamente le nostre capacità di pensiero. Consideriamo cosa possiamo esprimere con ricorsione che non potremmo senza: relazioni causali annidate ("X successe perché Y successe perché Z successe"), attribuzioni di stati mentali ricorsive ("A crede che B sappia che C pensa che D sente che..."), specificazioni precise attraverso modificazione ricorsiva ("il libro sulla scrivania nella stanza in quella casa in via Roma"). Ognuna di queste costruzioni permette precisione e nuance che coordinazione semplice non catturebbe. La ricorsione non è solo economica (genera infinità da finitudine) ma espressivamente essenziale. Eppure questa capacità straordinaria opera sotto vincoli severi. La degradazione rapida oltre pochi livelli di annidamento non è limitazione accidentale o superabile con training, ma riflette architettura computazionale del cervello umano. Siamo sistemi finiti che hanno evoluto la capacità di concettualizzare infinito, ma manteniamo impronte della nostra finitezza. Questa tensione tra competenza ideale e performance limitata non è bug ma feature: riflette soluzione evolutiva a problema di massimizzare espressività sotto vincoli di risorsa. L'evoluzione ha ottimizzato per il linguaggio che usiamo realmente - conversazione quotidiana con annidamento limitato - non per possibilità teoriche di embedding arbitrario. La ricorsione linguistica è anche profondamente culturale. Sebbene la capacità sottostante sembri universale, le sue manifestazioni specifiche sono modellate da storia linguistica e pressioni comunicative particolari di ciascuna comunità. Il tedesco, con i suoi verbi raggruppati alla fine di clausole subordinate, crea configurazioni di center-embedding particolarmente dense. Il giapponese, con ordine pre-nominale e particelle esplicite, distribuisce carico cognitivo diversamente. Le lingue dei segni, sfruttando modalità visivo-gestuale e simultaneità, implementano ricorsione in modi senza analogo diretto in lingue parlate. Questa variazione non è superficiale ma riflette soluzioni diverse allo stesso problema architetturale: come implementare ricorsione in modo processabile.

Se dovessimo tentare una sintesi dei risultati principali emersi dal presente contributo, potremmo articolare le seguenti conclusioni, ciascuna accompagnata da qualificazioni importanti:

Prima: La ricorsione sintattica è proprietà robusta e probabilmente universale delle lingue naturali umane, implementata attraverso meccanismi diversi ma convergente su funzionalità comune di permettere embedding di strutture in strutture dello stesso tipo. *Qualificazione:* il caso Pirahã rimane controverso e potrebbe rappresentare eccezione, ma anche se confermato, potrebbe riflettere soppressione culturale di capacità universale piuttosto che assenza biologica.

Seconda: La ricorsione non è proprietà esclusivamente linguistica ma manifestazione in dominio linguistico di capacità cognitiva più generale di rappresentazione e manipolazione gerarchica. *Qualificazione:* la ricorsione sintattica potrebbe comunque avere peculiarità che la distinguono da ricorsione in altri domini, particolarmente nella sua combinazione con simbolismo discreto e composizionalità semantica.

Terza: Il processamento di strutture ricorsive è vincolato da limiti architetturali della cognizione umana, particolarmente capacità di memoria di lavoro, risultando in

degradazione rapida oltre 2-3 livelli di center-embedding. *Qualificazione*: questi limiti non sono uniformi - right-branching recursion è molto meno costosa - suggerendo che la difficoltà deriva da interazione tra ricorsione e memoria seriale piuttosto che da ricorsione per sé.

Quarta: Le basi neurali della ricorsione coinvolgono network frontoparietale sinistro, con contributi di area di Broca, regioni parietali, e connessioni tra queste attraverso fascicolo arcuato. *Qualificazione*: questa circuiteria non è esclusivamente dedicata a ricorsione linguistica ma condivisa con altre funzioni esecutive e di memoria di lavoro, suggerendo specializzazione parziale piuttosto che modulo dedicato.

Quinta: L'acquisizione della ricorsione procede gradualmente durante infanzia (2-5 anni), influenzata da maturazione cognitiva, sviluppo di memoria di lavoro, ed esposizione a input linguistico. *Qualificazione*: la traiettoria di sviluppo mostra variabilità cross-culturale e individuale sostanziale, con fattori sia biologici che ambientali che contribuiscono.

Sesta: Implementazioni computazionali di ricorsione sono possibili e hanno raggiunto prestazioni impressionanti, ma sistemi attuali probabilmente approssimano pattern ricorsivi statisticamente piuttosto che implementare principi compositivi genuini.

Qualificazione: la distinzione tra "genuina ricorsione" e "approssimazione statistica" potrebbe essere meno netta di quanto teorie tradizionali assumano - apprendimento statistico su dati appropriati potrebbe convergere su rappresentazioni funzionalmente equivalenti a regole simboliche. Queste conclusioni, per quanto robuste, non devono essere fraintese come parola finale. La scienza è processo iterativo di raffinamento progressivo, non rivelazione di verità assolute. Ogni conclusione qui articolata è provvisoria, soggetta a revisione alla luce di nuove evidenze. Infatti, l'onestà intellettuale richiede che identifichiamo esplicitamente dove la nostra conoscenza è più incerta.

Incertezze fondamentali

Tre questioni in particolare rimangono profondamente incerte:

Primo, la questione evolutiva: non sappiamo quando né come la ricorsione sintattica emerse nella linea umana. Era presente in antenato comune di tutti gli umani moderni (suggerendo origine almeno 50.000-100.000 anni fa), o emersa indipendentemente in popolazioni diverse? Era innovazione singola e recente, o risultato di elaborazione graduale estesa su milioni di anni? L'assenza di "fossili linguistici" rende queste domande terribilmente difficili da risolvere empiricamente. Possiamo costruire scenari plausibili e modelli computazionali di evoluzione linguistica, ma rimangono speculativi.

Secondo, la questione del realismo psicologico dei formalismi: le grammatiche formali (CFG, TAG, CCG, ecc.) che linguisti usano per modellare ricorsione sono correttamente viste come descrizioni accurate di conoscenza mentale internalizzata, o sono semplicemente strumenti matematici che simulano comportamento linguistico senza corrispondenza con rappresentazioni reali nel cervello? Chomsky ha tradizionalmente affermato il primo, molti psicolinguisti e neuroscienziati sono scettici. La questione non è puramente filosofica ma ha

conseguenze empiriche: predizioni diverse su acquisizione, processamento, e deficit clinici seguono da queste visioni alternative.

Terzo, la questione della modularità: fino a che punto la ricorsione linguistica è supportata da meccanismi dedicati versus meccanismi dominio-generalì? Evidenze esistono per entrambe le posizioni. Dissociazioni cliniche e specificità neurale suggeriscono specializzazione; correlazioni con altre capacità cognitive e condivisione di circuiteria neurale suggeriscono dominio-generalità. Probabilmente la verità è intermedia e complessa: architettura cognitiva umana non è né massivamente modulare né completamente dominio-generale, ma qualcosa di più sfumato che categorie dicotomiche non catturano adeguatamente.

Riflessione finale: la ricorsione come auto-applicazione del pensiero

Questo documento stesso - con le sue sezioni che contengono sottosezioni che contengono paragrafi, con le sue argomentazioni che contengono sub-argomentazioni, con le sue citazioni di opere che citano altre opere - esemplifica ciò che descrive. La struttura ricorsiva del testo non è accidentale ma inevitabile: il pensiero analitico è intrinsecamente ricorsivo. Scomponiamo problemi complessi in sottoproblemi, che scomponiamo ulteriormente, creando alberi di analisi che rispecchiano alberi sintattici che il linguaggio genera. Studiare la ricorsione è quindi studiare la struttura del nostro stesso pensiero - un'istanza di auto-applicazione che la cognizione umana può compiere ma che rende l'obiettività completa sfuggente. Non possiamo uscire completamente dal sistema ricorsivo per osservarlo "da fuori" perché i nostri strumenti di osservazione - linguaggio, pensiero, ragionamento - sono essi stessi ricorsivamente strutturati. Questo non condanna l'impresa alla futilità, ma richiede umiltà epistemica: la nostra comprensione della ricorsione sarà sempre parziale, sempre mediata attraverso le stesse capacità ricorsive che cerchiamo di comprendere. Eppure questa circolarità non è viziosa ma generativa. Ogni ciclo di ricerca - teoria, test empirico, raffinamento teorico - porta comprensione incrementale. Costruiamo formalismi sempre più precisi, raccogliamo dati sempre più dettagliati, sviluppiamo modelli sempre più sofisticati. Il progresso non è lineare verso verità finale ma spirale verso approssimazione progressivamente migliore.

La ricorsione continuerà a essere studiata dalle prossime generazioni di linguisti, psicologi, neuroscienziati, filosofi - non perché non comprendiamo niente, ma perché comprendiamo abbastanza per formulare domande sempre più precise. In questo senso, la ricorsione nella ricerca sulla ricorsione non è solo metafora ma realtà: ogni livello di analisi rivela complessità che richiede ulteriore analisi ricorsiva. Le domande generano sotto-domande, che generano sotto-sotto-domande. Le risposte sono sempre parziali, sempre aprono nuove questioni. Questo non è difetto della scienza ma sua essenza: la ricerca è processo infinito (o almeno indefinitamente estendibile) di raffinamento progressivo, governato da imperativi ricorsivi di precisione crescente. La ricorsione linguistica rimane, appropriatamente, mistero parzialmente svelato - comprendiamo molto dei suoi meccanismi formali, qualcosa delle sue basi cognitive e neurali, poco delle sue origini evolutive, e meno ancora delle sue conseguenze filosofiche profonde. Ma questa ignoranza parziale non rappresenta fallimento; è condizione normale della ricerca scientifica su fenomeni complessi.

Ogni risposta conquistata è vittoria genuina, anche se apre ulteriori domande. Se questo lavoro ha comunicato qualcosa della profondità affascinante della ricorsione - come fenomeno linguistico, come capacità cognitiva, come proprietà formale, come problema filosofico - avrà servito il suo scopo. La ricorsione non è dettaglio tecnico relegato a footnote in manuali di sintassi, ma finestra su proprietà fondamentali della mente umana. Parole che contengono parole che contengono parole: questa possibilità apparentemente semplice supporta gran parte di ciò che distingue la cognizione umana - linguaggio illimitatamente espressivo, pensiero complesso, cultura cumulativa, scienza stessa.

Lo studio della ricorsione è, alla fine, studio di noi stessi come esseri pensanti e parlanti. È investigazione di come generiamo infinità da finitezza, di come rappresentiamo gerarchia in reti neurali, di come il biologico supporta il simbolico, di come l'evoluzione ha prodotto menti capaci di comprendere la propria struttura. Queste non sono domande che ammetteranno risposte semplici o finali. Ma sono domande che vale la pena continuare a porre, investigare, raffinare - ricorsivamente, indefinitamente, con umiltà intellettuale ma anche con ambizione di comprendere sempre più profondamente le capacità straordinarie che ci rendono umani. La ricorsione, dopotutto, non è solo nel linguaggio che studiamo, ma nel processo stesso dello studio. E questa auto-applicazione - pensiero che pensa il pensiero, linguaggio che descrive il linguaggio, ricorsione applicata alla comprensione della ricorsione - è forse la manifestazione più profonda di ciò che la ricorsione rende possibile: la capacità della mente umana di riflettere su se stessa, di comprendere la propria struttura, di trascendere la propria finitezza biologica attraverso strumenti simbolici che la stessa finitezza ha evoluto.